

Marcos Tesch Cavicchia

**Robô manipulador de seis links de geometria  
não convencional para posicionamento de  
pacientes em tratamentos de próton-terapia**

**Vitória**

**2014**

Marcos Tesch Cavicchia

**Robô manipulador de seis links de geometria não  
convencional para posicionamento de pacientes em  
tratamentos de próton-terapia**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Coordenadoria do Curso de Bacharelado em  
Engenharia Mecânica da Universidade Fede-  
ral do Espírito Santo, como requisito parcial  
para obtenção do título de Bacharel em En-  
genharia Mecânica .

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Centro Tecnológico

Departamento de Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Antônio Bento Filho

Vitória

2014

Marcos Tesch Cavicchia

# **Robô manipulador de seis links de geometria não convencional para posicionamento de pacientes em tratamentos de próton-terapia**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica .

Trabalho aprovado. Vitória, 19 de dezembro de 2014:

---

**Prof. Dr. Antônio Bento Filho**

Orientador

---

**Prof. M.Sc. Rafael Milanezi de Andrade**

Universidade Federal do Espírito Santo

---

**Prof. M.Sc. Oswaldo Paiva Almeida Filho**

Universidade Federal do Espírito Santo

---

**M.Sc. Carmen Ribeiro Faria Santos**

Universidade Federal do Espírito Santo

---

**B.El. Matheus Darós Pagani**

Universidade Federal do Espírito Santo

Vitória

2014

*Dedico este trabalho à minha mãe,  
minha família,  
meus amigos  
e meus mestres*

*"Obstacles are those frightful things you see  
when you take your eyes off your goal."  
(Henry Ford)*

# Resumo

Este trabalho apresenta o estudo da cinemática direta de um robô do tipo manipulador de seis links não convencional. O robô aqui tratado é utilizado especificamente no posicionamento de pacientes durante seções de próton-terapia, uma nova modalidade de radioterapia que garante efeitos colaterais a longo prazo praticamente inexistentes em pacientes submetidos ao tratamento. Este robô é dito não-convencional por se tratar de um projeto especial realizado para operar em ambientes menores e diretamente com o bem-estar de humanos, o que insere certas características de operação peculiares ao mesmo, que diferem do que é normalmente encontrado na literatura de robôs industriais.

**Palavras-chaves:** robô. manipulador. radioterapia. próton-terapia. cinemática.

# Abstract

This document presents the study of the direct cinematic of a six-axis unconventional manipulator-type robot. The subject is used specifically on the positioning of patients during proton-therapy sections, a new kind of radiotherapy that guarantees practically non-existent long-term collateral effects on patients submitted to the treatment. This robot is said unconventional because it has a special design, idealized to operate in smaller environments and directly with the well-being of humans, what inserts on the robot certain peculiar operational characteristics, who differ of what is normally found within the literature of industrial robots.

**Key-words:** robot. manipulator. radiotherapy. proton-therapy. cinematic.

# Lista de ilustrações

|                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Optimus Prime, principal personagem robótico da série Decepticons . .                                                                                                                                                                     | 15 |
| Figura 2 – Robô manipulador KUKA - largamente utilizado em aplicações industriais.                                                                                                                                                                   | 16 |
| Figura 3 – Robô Curiosity, enviado à marte em 2011. . . . .                                                                                                                                                                                          | 17 |
| Figura 4 – <i>Remotely Operated Vehicle</i> em operação de reconhecimento. . . . .                                                                                                                                                                   | 18 |
| Figura 5 – Impressora 3d executando a prototipagem rápida de um modelo cine-<br>matográfico. . . . .                                                                                                                                                 | 18 |
| Figura 6 – Prótese robótica do antebraço/mão em atuação. . . . .                                                                                                                                                                                     | 19 |
| Figura 7 – Profundidade de penetração da partícula X Dose relativa . . . . .                                                                                                                                                                         | 23 |
| Figura 8 – Diagrama ilustrativo mostrando a dosagem de radiação (eixo vertical)<br>como função da distância penetrada (eixo horizontal) para comparação<br>de radiação por raios-X e próton-terapia. <b>Fonte:</b> MarkFilipak . . . . .             | 26 |
| Figura 9 – Exemplo de filtro instalado na saída do canhão . . . . .                                                                                                                                                                                  | 27 |
| Figura 10 – Exemplo de canhão fixo. . . . .                                                                                                                                                                                                          | 28 |
| Figura 11 – Exemplo de canhão móvel. <b>Fonte:</b> <a href="http://protontherapie.curie.fr/">http://protontherapie.curie.fr/</a> . .                                                                                                                 | 28 |
| Figura 12 – Exemplo de ferramenta cadeira . . . . .                                                                                                                                                                                                  | 29 |
| Figura 13 – Exemplo de ferramenta leito . . . . .                                                                                                                                                                                                    | 29 |
| Figura 14 – Exemplo de ferramenta usada para calibrar a potência do feixe de acordo<br>com o posicionamento do robô <b>Fonte:</b> <a href="http://www.iba-dosimetry.com/">http://www.iba-dosimetry.com/</a> . . . . .                                | 30 |
| Figura 15 – Desenho esquemático das possíveis configurações robô/ferramenta . . .                                                                                                                                                                    | 31 |
| Figura 16 – Exemplo de mascara de fixação <b>Fonte:</b> <a href="http://protontherapie.curie.fr/">http://protontherapie.curie.fr/</a> . . . . .                                                                                                      | 32 |
| Figura 17 – Posicionamento das câmeras dentro da sala de tratamento . . . . .                                                                                                                                                                        | 32 |
| Figura 18 – Profissional da saúde realizando as marcações necessárias para controle<br>do deslocamento da cabeça do paciente . . . . .                                                                                                               | 33 |
| Figura 19 – Ilustração esquemática de como é feito o controle do posicionamento<br>interno do tumor momentos antes da aplicação de radiação <b>Fonte:</b><br><a href="http://protontherapie.curie.fr/">http://protontherapie.curie.fr/</a> . . . . . | 34 |
| Figura 20 – Sala de testes do robô . . . . .                                                                                                                                                                                                         | 35 |
| Figura 21 – Destaque da câmera infravermelho utilizada na verificação da acurácia<br>do posicionamento . . . . .                                                                                                                                     | 36 |
| Figura 22 – Posicionamento da câmera infravermelho na sala de tratamento . . . .                                                                                                                                                                     | 37 |
| Figura 23 – Manipulador tipo 3R . . . . .                                                                                                                                                                                                            | 39 |
| Figura 24 – Link ( $i$ ) e sua junta inicial ( $i$ ) e junta final ( $i+1$ ) . . . . .                                                                                                                                                               | 41 |
| Figura 25 – Soluções múltiplas da cinemática inversa para um manipulador plano 2R                                                                                                                                                                    | 43 |
| Figura 26 – Representação em 3D do manipulador, destacando diferentes links com<br>diferentes cores . . . . .                                                                                                                                        | 44 |
| Figura 27 – Pontos de movimentos do robô . . . . .                                                                                                                                                                                                   | 46 |

|                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 28 – Esqueleto de juntas e links na posição inicial do manipulador . . . . .                                                                                          | 47 |
| Figura 29 – Esqueleto de juntas e links na posição inicial do manipulador com<br>destaque na direção de atuação das juntas e sua relação com os pontos<br>iniciais . . . . . | 48 |
| Figura 30 – Montagem final do manipulador . . . . .                                                                                                                          | 48 |
| Figura 31 – Possível configuração das juntas (a) . . . . .                                                                                                                   | 49 |
| Figura 32 – Possível configuração das juntas (b) . . . . .                                                                                                                   | 49 |
| Figura 33 – Primeira validação . . . . .                                                                                                                                     | 53 |
| Figura 34 – Segunda validação . . . . .                                                                                                                                      | 53 |
| Figura 35 – Terceira validação . . . . .                                                                                                                                     | 54 |

# Sumário

|          |                                                              |           |
|----------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                            | <b>11</b> |
| 1.1      | Objetivo                                                     | 11        |
| 1.2      | Histórico da Radioterapia                                    | 12        |
| 1.3      | Conceituando Robótica                                        | 14        |
| 1.3.1    | Estado da Técnica da Robótica                                | 15        |
| 1.4      | Importância da Modelagem Matemática de Robôs                 | 19        |
| <b>2</b> | <b>RADIOTERAPIA</b>                                          | <b>20</b> |
| 2.1      | Estado da Arte da Radioterapia                               | 20        |
| 2.2      | Estado da Técnica da Radioterapia                            | 20        |
| 2.3      | Classificações da Radioterapia                               | 21        |
| 2.4      | Terapia de Partículas - Uma Derivada da Radioterapia Externa | 22        |
| 2.4.1    | Fundamentos Específicos da Terapia de Partículas             | 22        |
| <b>3</b> | <b>O TRATAMENTO POR PRÓTON-TERAPIA</b>                       | <b>25</b> |
| 3.1      | Procedimentos                                                | 27        |
| 3.1.1    | Método de Individualização do Feixe Protônico                | 27        |
| 3.1.2    | Salas de Tratamento                                          | 27        |
| 3.1.3    | Ferramentas para Suporte do Paciente                         | 28        |
| 3.1.4    | Sensoriamento e Monitoramento da Precisão da Posição Final   | 31        |
| 3.2      | O Robô                                                       | 34        |
| <b>4</b> | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>                                   | <b>38</b> |
| 4.1      | Estruturas Geométricas Básicas                               | 38        |
| 4.1.1    | Manipulador Robótico                                         | 39        |
| 4.1.2    | Pulso Robótico                                               | 39        |
| 4.2      | Modelamento Matemático                                       | 40        |
| 4.2.1    | Cinemática Direta                                            | 40        |
| 4.2.1.1  | A Convenção de Denavit-Hartenberg                            | 41        |
| 4.2.2    | Cinemática Inversa                                           | 42        |
| <b>5</b> | <b>MODELAGEM DO PROTÓTIPO</b>                                | <b>44</b> |
| 5.1      | Parâmetros Geométricos do Robô                               | 44        |
| 5.2      | Cinemática Direta                                            | 46        |
| 5.3      | Validação da Cinemática Direta                               | 51        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÃO</b>                                             | <b>55</b> |

**Referências . . . . . 56**

# 1 Introdução

Com o avanço tecnológico em áreas medicinais, como produção de fármacos, cirurgias e tratamentos de alta precisão, os processos estão ficando cada vez mais sofisticados, muitas vezes a ponto de necessitarem qualidades superiores ao que pode ser oferecido por operários humanos, como grande precisão aliada a força e estabilidade, e algumas vezes movimentos complexos em alta velocidade. Nestes processos, é imprescindível a adoção de uma solução automatizada, que ajude o profissional responsável e forneça as qualidades necessárias ao processo.

Nestes processos, estritas exigências devem ser atendidas, pois qualquer erro causado por uma falha na automação pode induzir consequências catastróficas que afetam diretamente a saúde das pessoas envolvidas.

Este trabalho foca exatamente nestas exigências, pois o único modo de atendê-las oferecendo um bom grau de confiabilidade é entender a fundo o comportamento cinemático e dinâmico do equipamento utilizado.

No caso analisado, é adotado um manipulador industrial de médio porte, que tem sua estrutura otimizada para ocupar o menor espaço possível, dadas as limitações dimensionais do ambiente em que o mesmo atuará. Esta otimização se deu alterando a disposição do ângulo de uma de suas juntas em relação ao que é comumente adotado, o que torna a análise cinemática ligeiramente diferente do que é usual para robôs manipuladores industriais.

## 1.1 Objetivo

A próton-terapia é hoje considerada o estado da arte da terapia de radiação externa, ou como é comumente conhecida, radioterapia. A próton-terapia, apesar de ser uma tecnologia relativamente nova, já é aplicada em pessoas em mais de 60 centros de pesquisa ao redor do globo.

Neste trabalho é apresentado um breve histórico da radioterapia, até o estado tecnológico em que ela se encontra hoje. É também discursado sobre os princípios básicos de funcionamento da próton-terapia e suas vantagens em relação à terapia de radiação externa convencional. No entanto, por se tratar de uma tecnologia muito nova, a próton-terapia apresenta diversas barreiras tecnológicas a serem quebradas até que a mesma possa ser utilizada livremente em hospitais.

O objetivo deste trabalho é focado exatamente em um dos maiores obstáculos à difusão da radioterapia em hospitais, que é a precisão necessária no posicionamento do paciente durante as seções de tratamento. A mesma deve ser feita por um robô para amenizar tal problema. Por fim, são apresentados os fundamentos teóricos necessários para a construção da cinemática direta, a própria cinemática direta deste robô, e sua validação.

## 1.2 Histórico da Radioterapia

No final do século XIX duas descobertas revolucionaram por completo a história universal: os raios-X, descobertos em 1895 pelo físico alemão Wilhelm Röntgen, e a radioatividade, descoberta em 1898 na França pelo casal Curie (Maria Skłodowska – mais tarde conhecida por Marie Curie, a única pessoa a ganhar dois prêmios-Nobel da física- e Pierre Curie seu marido) e por Antoine Henri Becquerel. Era o início de um processo de desenvolvimento para inúmeras novas aplicações, entre as quais a Radioterapia (utilização de radiações ionizantes para efeitos terapêuticos). Logo depois de Röntgen ter publicado a sua descoberta (justamente com a imagem de uma radiografia de uma mão), ocorreram diversas aplicações da radiação quer em diagnóstico quer em terapia. A aplicação terapêutica de radiação X ou de radiação gama passou então a chamar-se de tele-Röntgen-gama-terapia, sendo a precursora da atual Radioterapia Externa. Por outro lado, a utilização de fontes radioativas junto ao (ou dentro do) corpo humano chamou-se Curie-terapia, sendo a precursora da atual Radioterapia interna ou Braquiterapia.

Durante o século XX, a evolução tecnológica (particularmente a evolução nos campos da informática e da aquisição de imagem) foi sendo aproveitada nas Radioterapias (externa e interna), dando origem a evoluções significativas, das quais destacam-se as seguintes:

- Início do século XX – Aparelhos produtores de radiação-X em áreas terapêutica.
- Década de 30 – Primeiras “Bombas de Cobalto”, com energias da gama do milhão de elétron-volt.
- Década de 50 – Primeiro equipamento específico para efetuar Radioterapia cerebral desenvolvida sob orientação do Prof. Lars Leksell.
- Década de 60 – Implementação dos primeiros aceleradores lineares específicos.
- Década de 80 – Equipamento de aquisição de imagens TAC. O qual permitiu a realização de planimetrias bidimensionais, abrindo as portas aos planeamentos tridimensionais.
- Década de 90 – Ressonância Magnética e PET, juntamente com o desenvolvimento da ecografia, permitindo uma efetiva visualização dos volumes-alvo e dos tecidos adjacentes. A evolução informática permitiu o desenvolvimento efetivo das planimetrias tridimensionais. Desenvolve-se a Terapia com Feixes de Partículas (particularmente Prótons e Carbono). Surgem os primeiros EPID (*Electronic Portal Imaging Devices*), que permitiram o desenvolvimento da integração da imagem com a terapia.

Nas primeira década do século XXI foram desenvolvidas técnicas mais sofisticadas de planimetria e tratamento, com a integração completa entre a imagem e tratamento. Foram produzidos aceleradores com sistemas de sincronização entre a respiração e a irradiação (com a chamada Radioterapia 4D), desenvolveu-se técnicas de irradiação como a Radioterapia de Intensidade Modelada (IMRT) e a Radioterapia Guiada por Imagem (IGRT), desenvolve-se a Radio cirurgia (craniana e corporal), a Terapia em Arco Dinâmico e novos equipamentos de irradiação como a Tomoterapia, a Ciberknife e os novos aceleradores lineares com sistemas de imagem integrada. Hoje, a Radioterapia é utilizada em inúmeros casos (oncológicos e não-oncológicos sendo esperado que mais de 60% de todos os doentes oncológicos, em qualquer fase de evolução da doença, venham a se beneficiar de tratamento com radioterapia. A crescente integração das áreas subjacentes à Radioterapia (a Física das Radiações e a Radiobiologia) permite antever que muito rapidamente se chegue a uma radioterapia personalizada: onde cada doente seja tratado com uma dose específica para a sua tipologia genética, em estreita interação com terapias com nanotecnologia (nomeadamente a utilização de nanopartículas que transportem fontes radioativas que se depositarão essencialmente nas células malignas) ([Lenicare - Unidade de Radioterapia de Alentejo, 2013](#)).

## 1.3 Conceituando Robótica

"Lei Um: Um Robô não pode ferir um ser humano ou, por inação, permitir que um ser humano sofra algum mal.

Lei Dois: Um Robô deve obedecer as ordens que lhe sejam dadas por seres humanos exceto nos casos em que tais ordens entrem em conflito com a Primeira Lei.

Lei Três: Um Robô deve proteger sua própria existência desde que tal proteção não entre em conflito com a Primeira ou Segunda Leis."

([ASIMOV, 1968](#))

O precursor do termo robô foi Karel Capek, novelista e escritor de uma peça teatral da Tchecoslováquia, que usou pela primeira vez, em 1920, a palavra “robota” (serviço compulsório, atividade forçada) originando a palavra “robot” em inglês e traduzido para o português como “robô”. Diversos filmes de ficção científica mostraram robôs produzidos com o comportamento e a forma humana, levando muitos jovens a pesquisar e desenvolver robôs para o mundo real. Com o surgimento dos computadores na metade do século, iniciaram-se especulações em termos da capacidade de um robô pensar e agir como um ser humano. No entanto, os robôs foram, neste período, criados especialmente para executarem tarefas difíceis, perigosas e impossíveis para um ser humano. Por outro lado, eles não eram projetados com a capacidade de criar ou executar processos que não lhes foram ensinados ou programados. Assim sendo, foram as indústrias que mais se beneficiaram com o desenvolvimento da robótica, aumentando a produção e eliminando tarefas perigosas, antes executadas por seres humanos. ([CARRARA, 2011](#))

Robôs e autômatos compõem grande parte da ficção científica atual, além dos diversos contos de Asimov, existem os icônicos C3P0 e R2D2 dos filmes de *Star Wars*, os robôs alienígenas da série *Decepticons* (figura 1), os robôs de *Matrix*, o T800 representado por Arnold Schwarzenegger em *Exterminador do Futuro*, o autômato Ultron, da *Marvel Comics*, entre outros. O grande fascínio da humanidade por ciborgues e autômatos rendeu brilhantes obras, em muitas delas o foco principal era "até onde a inteligência artificial pode ir?"([FERNANDES, 2014](#))



Figura 1 – Optimus Prime, principal personagem robótico da série Decepticons.

**Fonte:**<http://static.comicvine.com/>

Existem diversas definições formais do termo robô, porém, citaremos somente as duas mais largamente aceitas e utilizadas. A primeira delas foi postulada pela RIA (*Robotic Industries Association*), e propõe o seguinte:

“Um robô é um manipulador reprogramável, multifuncional, desenvolvido para mover material, partes, ferramentas ou dispositivos especializados através de variados movimentos programados para executar uma variedade de tarefas”.

A outra é apresentada pela JIRA (*Japanese Industrial Robots Association*), e apresenta uma definição ligeiramente diferente da anterior:

"Um robô é um sistema mecânico de movimentos flexíveis, análogos aos movimentos de organismos vivos, ou combina tais movimentos com funções inteligentes e age em resposta à vontade humana. Neste contexto função inteligente significa a habilidade de fazer pelo menos uma das seguintes: Julgamento, Reconhecimento, Adaptação ou Aprendizado".

### 1.3.1 Estado da Técnica da Robótica

Cada dia mais campos de estudo e atuação inserem a automatização em seus meios como forma de otimização. Seja pela segurança, pela produtividade ou pela inviabilidade de execução do processo de alguma outra forma, o fato é que cada vez mais vemos robôs inseridos, tanto na indústria - seu campo primário de atuação - quanto em áreas onde a recente adoção da automação tem tornado aptos diversos avanços tecnológicos.

Em seguida é apresentada uma exemplificação desta inserção da robótica nos mais diversos nichos:

- Mecanismos de linha de produção - Existem atualmente inúmeros robôs trabalhando em linhas de produção industriais, seja para encaixar peças, soldar peças ou quaisquer outras operações que lhes couber. Os manipuladores são os mais largamente utilizados neste tipo de aplicação, pois oferecem uma larga gama de movimentos possíveis, que podem ser executados geralmente com velocidade e precisão relativamente altas (figura 2).

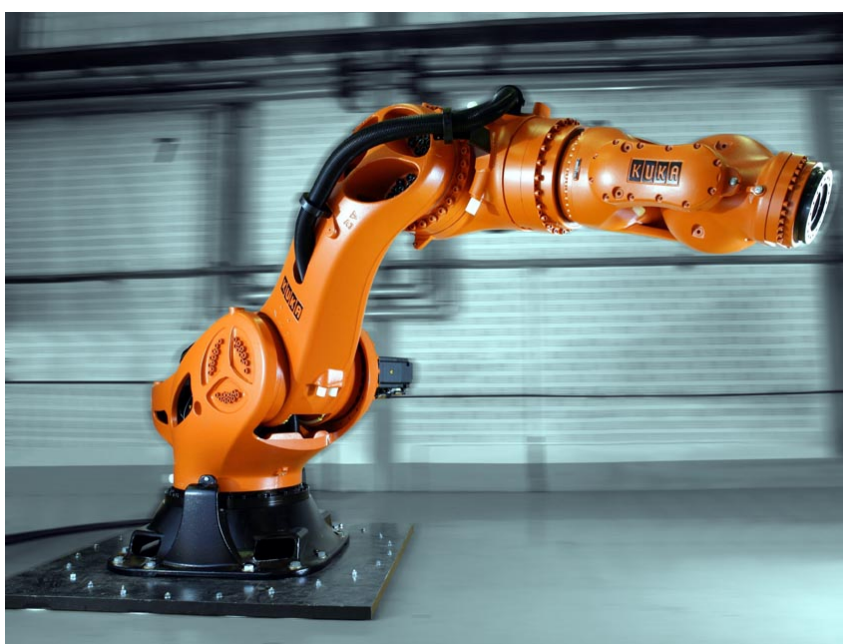


Figura 2 – Robô manipulador KUKA - largamente utilizado em aplicações industriais.

**Fonte:**<http://www.robots.com//>

- Exploração aeroespacial - Além de satélites, sondas e telescópios espaciais que utilizam tecnologia de ponta e já se encontram em operação, recentemente a humanidade foi ainda mais fundo, e enviou robôs para Marte para explorar sua superfície e coletar dados e amostras do planeta, o que poderá aumentar significativamente nosso entendimento do universo(figura 3).

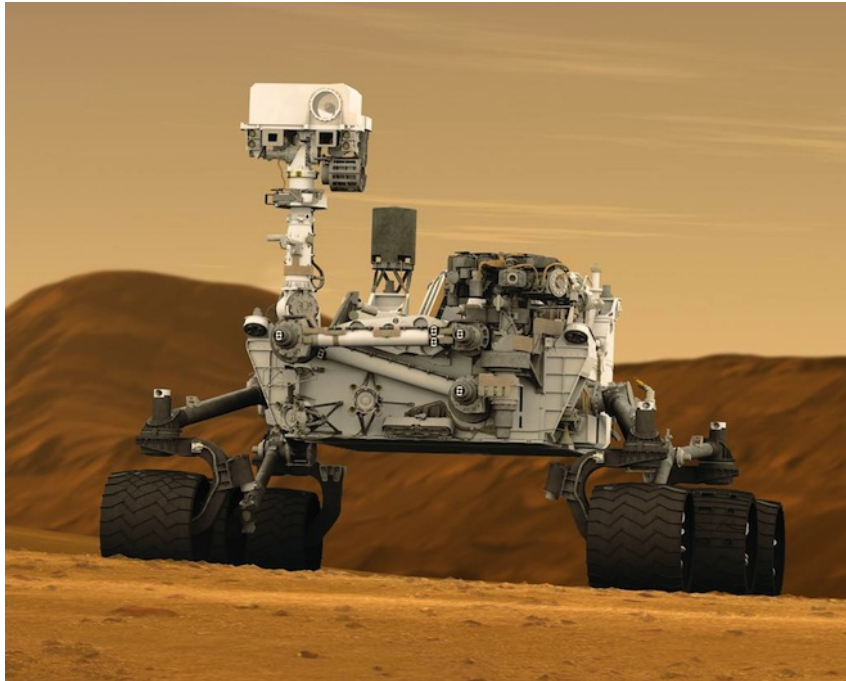


Figura 3 – Robô Curiosity, enviado à marte em 2011.

**Fonte:**<http://www.wired.com/>

- Ambientes extremos - Certos trabalhos devem ser realizados em ambientes que oferecem riscos à segurança e/ou à saúde do trabalhador. Nestes casos, é muito mais interessante termos um robô atuando no local (quando possível), e o operador em um local seguro controlando a operação do robô. Estes ambientes são diversos, desde locais atacados por desastres naturais, incêndios, locais de difícil acesso, ambientes em condições extremas de temperatura como frigoríficos, altas altitudes (onde operam os drones p.e.), ambientes marinhos subaquáticos (onde operam os R.O.V.s - *Remoted Operated Vehicles*) (figura 4), entre outros.

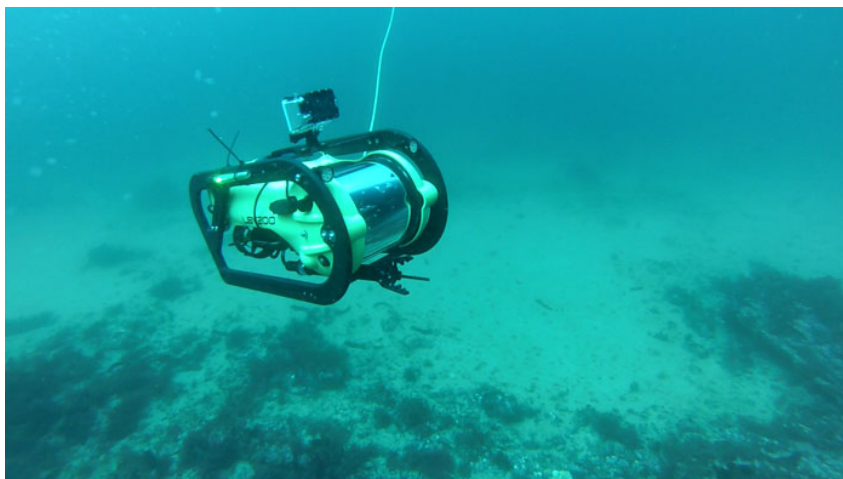


Figura 4 – *Remotely Operated Vehicle* em operação de reconhecimento.

**Fonte:**<http://www.wavec.org/>

- Fabricação - Uma das aplicações que mais exigem flexibilidade, rapidez e precisão aliadas a uma enorme gama de movimentos executáveis é a fabricação. Seja na usinagem de materiais metálicos como ocorre nos CNCs ou na prototipagem rápida feita hoje em dia pelas impressoras 3D (figura 5), estas quatro qualidades são imprescindíveis, tanto para assegurar a qualidade do que é fabricado, quanto para viabilizar o processo e os custos do mesmo

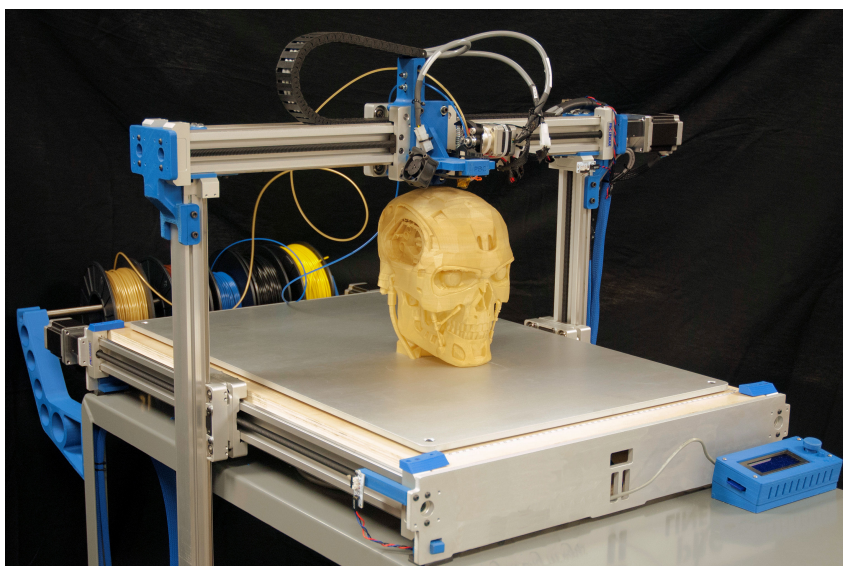


Figura 5 – Impressora 3d executando a prototipagem rapida de um modelo cinematográfico.

**Fonte:**<http://www.pbcllinear.com/>

- Medicina - A automação está presente nos mais diversos campos medicinais, desde a produção de fármacos até a implementação de próteses robóticas (figura 6) em pacientes acidentados ou deficientes. Além destes, temos também robôs auxiliando médicos em procedimentos cirúrgicos e, como é tratado mais adiante neste trabalho, autômatos responsáveis pelo posicionamento de pacientes em determinados tratamentos.



Figura 6 – Prótese robótica do antebraço/mão em atuação.

**Fonte:**<http://www.technobuffalo.com/>

## 1.4 Importância da Modelagem Matemática de Robôs

Existem diversas formas de controlar robôs manipuladores, porém a mais usual e precisa é através da cinemática direta e inversa. O modelamento da cinemática direta de posição relaciona o parâmetro de cada junta robótica com a posição final do tumor do paciente.

Um modelamento matemático correto da cinemática de posição é imprescindível ao modelamento da cinemática de velocidade e ao controle correto do posicionamento e da movimentação do robô, além de ser o primeiro e possivelmente mais importante passo a ser dado para um controle eficiente e preciso de qualquer robô manipulador.

## 2 Radioterapia

### 2.1 Estado da Arte da Radioterapia

A terapia de radiação, radioterapia, ou radiação oncológica, muitas vezes abreviada RT, RTX, ou XRT, é a terapia de radiação ionizante, geralmente adotada como parte intrínseca ao tratamento do câncer para controlar ou matar as células malignas. A terapia de radiação pode ser curativa em um certo número de tipos de cancro, se forem localizadas a uma área do corpo. A radioterapia também pode ser usada como parte de uma terapia adjuvante, para evitar a recorrência do tumor após a cirurgia de remoção de um tumor maligno primário (por exemplo, fases iniciais de cancro da mama). A terapia de radiação é sinérgica com a quimioterapia, e tem sido utilizada antes, durante e após a quimioterapia em cânceros susceptíveis.

Hodiernamente, o que se tem de mais avançado nesta área é a terapia de partículas, e neste trabalho abordaremos a necessidade de aplicação de um robô exatamente nestes novos tratamentos.

### 2.2 Estado da Técnica da Radioterapia

A terapia de radiação é geralmente aplicada ao tumor canceroso devido à sua capacidade de controlar o crescimento celular. A radiação ionizante atua na danificação do DNA do tecido canceroso, levando à morte celular. Para poupar os tecidos normais (como a pele ou órgãos pelos quais a radiação deve passar para tratar o tumor), feixes conformados de radiação são disparados a partir de vários ângulos de exposição para se cruzarem no tumor, proporcionando uma dose muito maior no tumor do que o que é absorvido ao redor do mesmo, ou seja, no tecido saudável. Além do próprio tumor, os campos de radiação podem também incluir os nódulos linfáticos de drenagem, se eles estão clinicamente ou radiologicamente envolvidos com o tumor, ou se há o risco de disseminação maligna subclínica. É necessário incluir uma margem de tecido normal ao redor do tumor para permitir incertezas no set-up diário (posição do paciente e dos equipamentos) e movimento interno do tumor. Estas incertezas podem ser causadas por movimentos internos (por exemplo, a respiração ou o enchimento da bexiga) e do movimento de marcas da pele externa em relação à posição do tumor.

Oncologia de radiação é a especialidade médica que atua com a prescrição de radiação, e é diferente de radiologia, o uso de radiação em imagiologia médica e diagnóstico. A radiação pode ser prescrita por um oncologista com a intenção de curar ("curativo") ou para a terapia adjuvante. Ele também pode ser usado como tratamento paliativo (onde cura não é possível e o objetivo é o controle local da doença ou alívio sintomático) ou como tratamento terapêutico (em que a terapia pode ser curativa). Também é comum combinar a terapia de radiação com cirurgia, quimioterapia, terapia hormonal, imunoterapia ou com uma mistura das quatro. A maioria dos tipos de cancro comuns podem ser tratados com terapia de radiação de alguma forma. A intenção precisa do tratamento (curativa, adjuvante, neoadjuvante, terapêutico, ou paliativo) vai depender do tipo de tumor, localização e fase, bem como o estado geral de saúde do paciente. Irradiação total do corpo (TBI) é uma técnica de terapia de radiação utilizada para preparar o corpo para receber um transplante de medula óssea. A braquiterapia, em que uma fonte de radiação é colocada no interior ou ao lado da área que necessita de tratamento, é uma outra forma de terapia de radiação que minimiza sua exposição ao tecido saudável durante os procedimentos para tratar os cânceros da mama, próstata e outros órgãos.

A radioterapia tem várias aplicações em condições não-malignas, como o tratamento da neuralgia do trigêmeo, neuromas acústicos, doenças da tireoide, pterígio, sinovite vilonodular pigmentada, e prevenção de crescimento cicatrização de quelóide, reestenose vascular, e ossificação heterotópica. O uso de terapia de radiação em condições não-malignas é limitada, em parte, por preocupações sobre o risco de câncer induzido pela radiação.

## 2.3 Classificações da Radioterapia

Historicamente, as três principais divisões da radioterapia são a radioterapia externa (RT ou XRT) ou teleterapia, braquiterapia ou radioterapia fonte selada, e terapia de radioisótopos sistêmica ou radioterapia de fonte não selada. As diferenças referem-se à posição da fonte de radiação. Radioterapia externa é aplicada pelo lado de fora do corpo, braquiterapia utiliza fontes radioativas seladas colocadas precisamente na área em tratamento, e radioisótopos sistêmicos são administradas por perfusão ou ingestão oral. A braquiterapia pode usar colocação temporária ou permanente de fontes radioativas. As fontes temporárias são geralmente aplicadas por uma técnica chamada *afterloading*. Em *afterloading* um tubo oco ou aplicador é colocado cirurgicamente no órgão a ser tratado, e as fontes são carregadas no aplicador após o implante do mesmo. Isso minimiza a exposição à radiação para os profissionais de saúde.

A terapia de partículas é um caso especial da terapia de radiação externa com feixes, onde as partículas são prótons ou íons mais pesados. Radioterapia intra-operatória ou IORT, segundo descrita por [J. \(2013\)](#), é um tipo especial de terapia de radiação que é entregue imediatamente após a remoção cirúrgica do cancro. Este método tem sido empregado em câncer de mama (Targeted radioterapia intraoperatórias ou TARGIT), tumores cerebrais e câncer retal.

## 2.4 Terapia de Partículas - Uma Derivada da Radioterapia Externa

Terapia de partículas é uma forma de radioterapia externa usando feixes de prótons, nêutrons, ou íons positivos para o tratamento de câncer. O tipo mais comum de terapia de partículas, que começou a ser aplicada em tratamentos à partir de 2012 é a terapia de prótons. Embora um fóton, utilizado na terapia com raios-X ou raios gama, também pode ser considerada uma partícula, a terapia de fótons não é aqui considerada. Além disso, a terapia de elétrons é geralmente colocada em sua própria categoria. Devido a isso, a terapia de partícula é por vezes referida, mais corretamente, como Hádron terapia (isto é, um tratamento com partículas feitas de quarks).

A terapia de captura de nêutrons pode ser considerado um tipo de terapia de partícula, mas ela não será discutida aqui, como o dano que faz a tumores é na maior parte dos íons energéticos produzidos pela reação secundário nuclear após os nêutrons no feixe externo serem absorvidos normalmente em boro-10, e não devido, principalmente, aos próprios nêutrons. É, portanto, um tipo de terapia de partícula secundária.

A Terapia Múon é um tipo raro de terapia de partícula que não se encaixa nas categorias previamente apresentadas, e que ocasionalmente tem sido testada em tratamentos.

### 2.4.1 Fundamentos Específicos da Terapia de Partículas

A terapia de partículas funciona alvejando partículas ionizantes energéticos no tumor alvo. De acordo com ([JAKEL, 2007](#)), estas partículas danificam o DNA das células do tecido, por fim causando sua morte. Devido à sua reduzida capacidade de reparar o DNA danificado, as células cancerosas são particularmente vulneráveis a ataques.

A figura 7 mostra como feixes de elétrons, raios-X e prótons, radiações de diferentes níveis de energia (expressa em MeV), penetram o tecido humano. Os elétrons possuem um curto alcance e são, portanto, apenas de interesse em regiões próximas às camadas mais superiores da pele. Raios-X de Bremsstrahlung penetram mais profundamente, mas a dose absorvida pelo tecido, em seguida, mostra o decaimento exponencial com o aumento da espessura típica. Para prótons e íons mais pesados (como isotopos do carbono), por outro lado, a dose aumenta à medida que as partículas penetram o tecido. Daí a dose aumenta com o aumento da espessura até o pico de Bragg, que ocorre perto do fim do alcance da partícula. Após o pico de Bragg, a dose cai para zero (no caso dos prótons) ou quase zero (no caso de íons mais pesados). (SUIT, 2009)

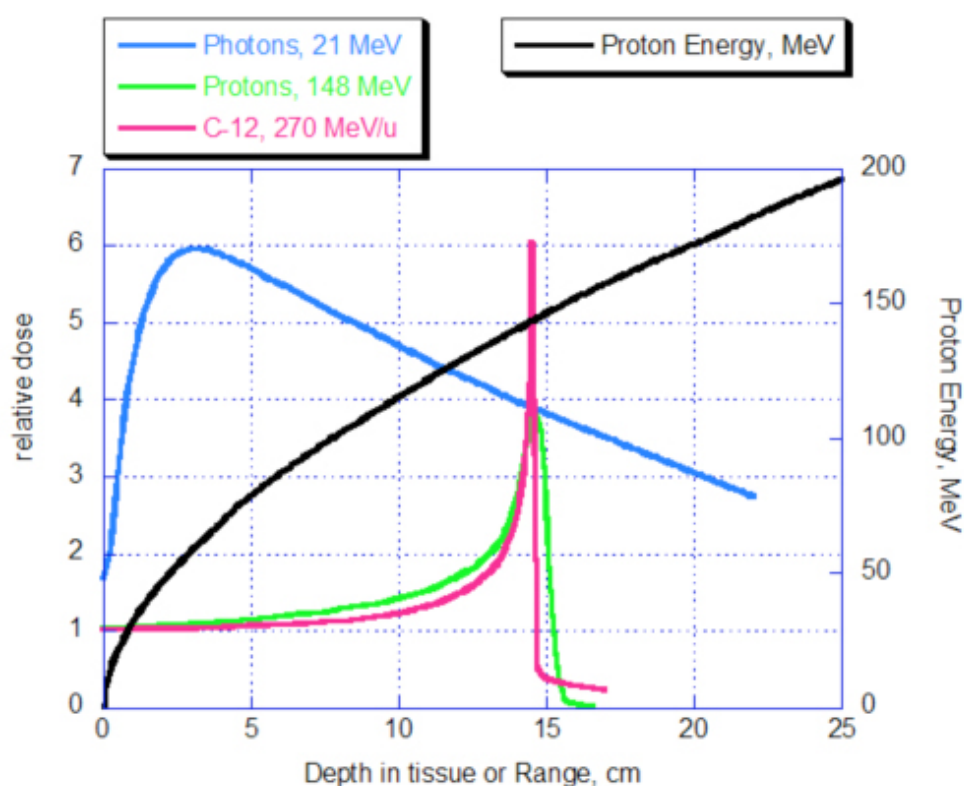


Figura 7 – Profundidade de penetração da partícula X Dose relativa.

**Fonte:** <http://www.enea.it/>

A vantagem deste perfil de deposição de energia é menos energia que é depositado no tecido saudável circundante do tecido alvo. Os iões são acelerados em primeiro lugar por meio de um ciclotron ou síncrotron. O final de energia do feixe emergente da partícula define a profundidade de penetração, e, portanto, a localização da deposição máxima de energia. Uma vez que é relativamente fácil desviar o feixe por meio de eletroímãs na direção transversal, é possível empregar um método de pesquisa de trama, ou seja, para digitalizar a área alvo rapidamente, do mesmo modo como o feixe de elétrons varre um tubo de TV. Se, além disso, a energia do feixe e, por conseguinte, a profundidade de penetração são variadas, todo um volume alvo pode ser coberto em três dimensões, proporcionando uma irradiação que siga exatamente a forma do tumor. Esta é uma das grandes vantagens em comparação com a terapia de raios-X convencional.

No final de 2008, 28 instalações de tratamento estavam em operação no mundo e mais de 70.000 pacientes tinham sido tratados por meio de píons, ([TRIUMF, 2014](#)) prótons e íons pesados. A maior parte desta terapia foi conduzida usando prótons.

Ja no final de 2013, apenas 5 anos depois, pudemos notar imensos avanços nesta área quando comparamos as 64 instalações de tratamento até então operantes em diversos locais do globo, bem como os mais de 120.000 pacientes tratados por píons. ([Particle Therapy Co-Operative Group, 2014](#))

### 3 O Tratamento por Próton-terapia

Próton-terapia, terapia de raios de prótons ou terapia de raios protônicos é um tipo de terapia de partículas que consiste na aplicação de raios protônicos em tecidos enfermos, mais comumente em tratamentos de câncer.

A grande vantagem da próton-terapia sobre os outros tipos de radioterapia externa é sua capacidade de definir com grande precisão a localização da dose máxima de radiação. Em uma revisão sistemática feita em 2009, (TEPPER; BLACKSTOCK, 2009) encontraram que "Nenhum estudo comparativo relatou diferenças estatisticamente significativas ou importantes na sobrevida específica por cânceres em geral ou em eventos adversos graves totais". Ou seja, o tratamento por próton-irradiação tende não deixar sequelas ou traumas.

A terapia de raios protônicos é um tipo de radioterapia externa que usa radiação ionizante. Durante uma seção de tratamento, profissionais da saúde utilizam um acelerador de partículas para alvejar um tumor com um feixe de prótons. As partículas projetadas danificam o DNA das células, por fim levando as mesmas à morte ou interrompendo sua reprodução. Células cancerígenas são particularmente vulneráveis à ataques ao seu DNA devido à sua alta taxa de divisão e sua reduzida capacidade de reparar danos em no DNA.

Devido à sua massa relativamente maior que outras partículas, prótons, quando em feixe, apresentam pouco dispersamento lateral no tecido. O raio protônico apresenta pouco crescimento de sua seção, ficando focado na forma do tumor e dispensa doses colaterais pequenas de radiação nos tecidos vizinhos. Todos os prótons de uma dada energia tem um certo alcance e pouquíssimos prótons penetram além deste alcance. Ademais, a dose aplicada de radiação atuante no tecido é máxima logo apos o últimos milímetros de trajetória da partícula. Este máximo é nomeado como pico de Bragg.(CAMPHAUSEN; LAWRENCE, 2008)

Para tratar de tumores em maiores profundidades, o acelerador de prótons deve produzir um feixe imbuído de maior nível de energia, normalmente mensurada em eV ou elétron-volt. A titulo de curiosidade, aceleradores usados para próton-terapia alvejam prótons com energia variando entre 70 e 250 MeV, sendo que esta energia pode ser ajustada para para maximizar o dano às células cancerígenas, dependendo, dentre outros fatores, da profundidade do tumor e do grau de avanço da enfermidade.

Na grande maioria dos tratamentos, prótons de diferentes níveis energéticos com picos de Bragg em diferentes profundidades são aplicados para tratar do tumor como um todo (figura 8). Estes picos de Bragg são ilustrados como linhas azuis contínuas. A dosagem total de radiação de prótons é chamada SOBP (*Spread-Out Bragg Peak*), e é ilustrada na forma de uma linha tracejada azul grossa. O que é importante ressaltar é o fato de que, apesar da região atrás do tumor em relação ao ponto de incidência do feixe não receber radiação na terapia de raios protônicos, os tecidos localizados à frente do tumor recebem uma dosagem de radiação determinada pela SOBP.

Por razões comparativas, é plotado também na figura 8 a distribuição da dosagem de radiação caso fosse utilizada um tipo de radioterapia externa convencional. Perceba que a quantidade total de radiação emitida ao corpo é muito maior neste caso, apesar da quantidade de radiação localizada no tumor ser praticamente a mesma. A isso se devem as diferenças entre os efeitos colaterais causados pela próton-terapia, que podem ser considerado praticamente inexistentes, e entre os efeitos adversos comumente observados em tratamentos mais convencionais de radioterapia externa, como vários tipos de câncer, principalmente de pele, e enfraquecimento de tecido vizinho saudável.

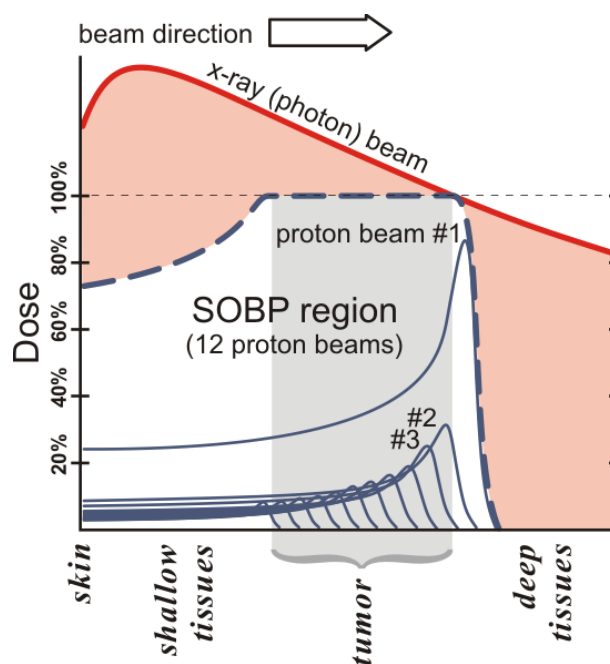


Figura 8 – Diagrama ilustrativo mostrando a dosagem de radiação (eixo vertical) como função da distância penetrada (eixo horizontal) para comparação de radiação por raios-X e próton-terapia. **Fonte:** MarkFilipak

## 3.1 Procedimentos

Objetivando causar a menor quantidade de dano possível em áreas saudáveis próximas ao local do tumor, a seção de tratamento é normalmente dividida em duas ou mais direções diferentes de incidência do raio feixe de prótons.

### 3.1.1 Método de Individualização do Feixe Protônico

Cada ponto e direção de entrada de feixe diferentes necessitam de um filtro (figura 9) para "conformar" o raio (ajustando a profundidade de partes da área de seção do feixe de modo que estas partes alcancem o pico de Bragg exatamente no lugar necessário) de acordo com a geometria e posicionamento do tumor. Este filtro é posicionado normalmente sobre o elemento final do canhão, logo antes do feixe de prótons entrar em contato com o paciente.



Figura 9 – Exemplo de filtro instalado na saída do canhão

Tendo em vista a execução deste procedimento, um mesmo paciente será posicionado de duas ou mais formas distintas durante uma mesma sessão de tratamento, de forma a variar a direção na qual o feixe de prótons é alvejado no tumor. Consequentemente, o robô deve ser não apenas preciso, mas se mover de uma forma que seja relativamente confortável ao paciente e gastando o menor tempo possível em cada sessão, para que um número maior de pacientes possam ser tratados diariamente.

### 3.1.2 Salas de Tratamento

As salas de tratamento são sempre equipadas de pelo menos um canhão protônico e um robô para o posicionamento de pacientes. O canhão pode ser fixo (figura 10) ou possuir certa liberdade de circulação (figura 11).

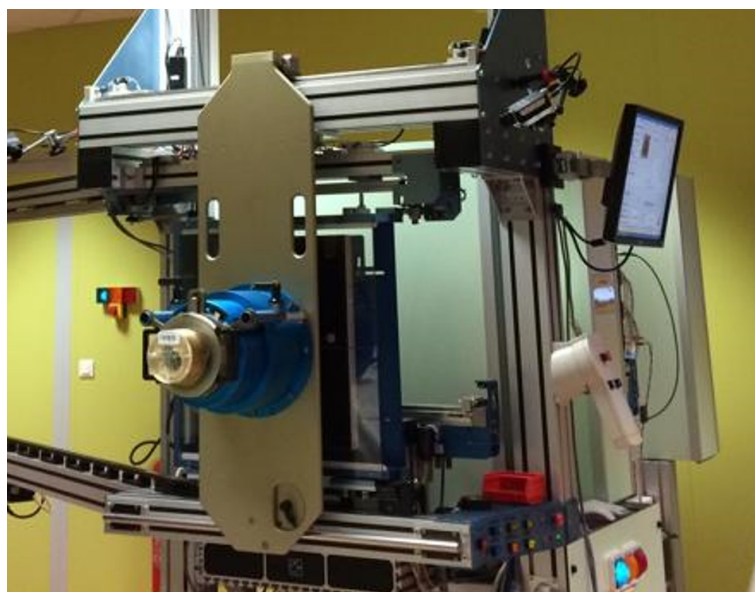


Figura 10 – Exemplo de canhão fixo.

Figura 11 – Exemplo de canhão móvel. **Fonte:** <http://protontherapie.curie.fr/>

Tanto em salas com canhão móvel quanto em salas com canhão fixo, é necessária a utilização de um robô para posicionar o paciente para assegurar a precisão deste posicionamento.

### 3.1.3 Ferramentas para Suporte do Paciente

A sala na qual o robô tratado neste trabalho atuará possui um canhão fixo, e é suficientemente grande para o tratamento de pacientes em posição deitada. Neste caso, duas ferramentas poderão ser usadas acopladas no robô como elemento final para posicionamento dos pacientes: uma cadeira (figura 12) e um leito (figura 13), ambos acopláveis pelo mesmo sistema que será discutido mais adiante.

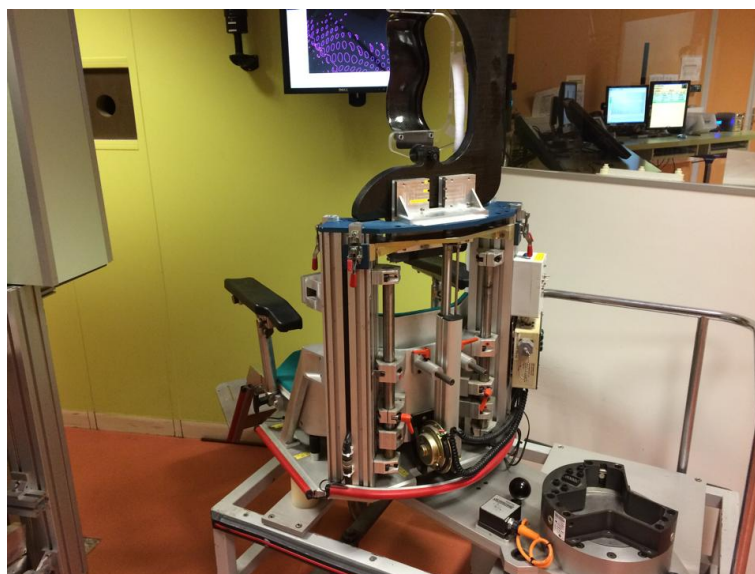


Figura 12 – Exemplo de ferramenta cadeira



Figura 13 – Exemplo de ferramenta leito

Além das duas ferramentas de posicionamento, uma ferramenta de calibração deve ser acoplada diariamente como elemento final do robô para verificar a exatidão do controle do mesmo e de seu sensoriamento. Esta ferramenta é chamada fantasma, e consiste basicamente de um caixa de água (porque apresenta praticamente a mesma resistência à penetração de partículas que o corpo humano) onde é inserido um sensor que captará a intensidade e a exatidão do feixe disparado pelo canhão. Podemos observar um exemplo na figura 14.



Figura 14 – Exemplo de ferramenta usada para calibrar a potência do feixe de acordo com o posicionamento do robô **Fonte:** <http://www.iba-dosimetry.com/>

O acoplamento das três ferramentas supracitadas é feito por meio de um mecanismo acoplador que é dividido em duas partes. A primeira é fixada sobre a última junta do robô e a segunda é fixada na ferramenta. Portanto, o acoplamento das três ferramentas é feito da mesma forma. O robô pode então operar nas três configurações ilustradas na figura 15 e, não importando a configuração, o projeto mecânico foi feito para que a troca de ferramenta possa ser feita de forma segura e rápida, e deve ser padronizada, definida e executada pelos profissionais da saúde.



Figura 15 – Desenho esquemático das possíveis configurações robô/ferramenta

#### 3.1.4 Sensoriamento e Monitoramento da Precisão da Posição Final

Ja foi discutido no presente trabalho a importância da precisão no fim da trajetória responsável pelo posicionamento do paciente. Garantir tal precisão global não é simplório, pois somadas as incertezas de posicionamento dos atuadores do robô, dos sensores de posição de cada link ativo e as imprecisões geradas pelo próprio paciente (respiração, deslocamento interno do tumor, desconforto, etc.), obtemos tolerâncias expressivamente restritivas entre o posicionamento final e o que foi pré-definido pelos profissionais de saúde.

Diferentes estratégias são postas paralelamente em pratica. Para explanar estas estratégias, detalhamos o procedimento de verificação da posição do paciente no tratamento de um tumor encefálico, tipo mais largamente tratado na sala em que o robô aqui estudado atuará.

Primeiramente é instalada, sobre a cabeça do paciente, uma mascara especial (figura 16) de um certo polímero e que apresenta uma geometria tal que é possível mapear, com certa precisão, seu deslocamento em relação à posição inicial da cabeça do paciente.



Figura 16 – Exemplo de máscara de fixação **Fonte:** <http://protontherapie.curie.fr/>

O Controle deste deslocamento é feito através de câmeras instaladas próximas ao canhão, posicionadas conforme mostrado na figura 17. Estas câmeras (destacadas por círculos vermelhos na figura 17) captam imagens em tempo real do paciente e enviam à sala de controle.

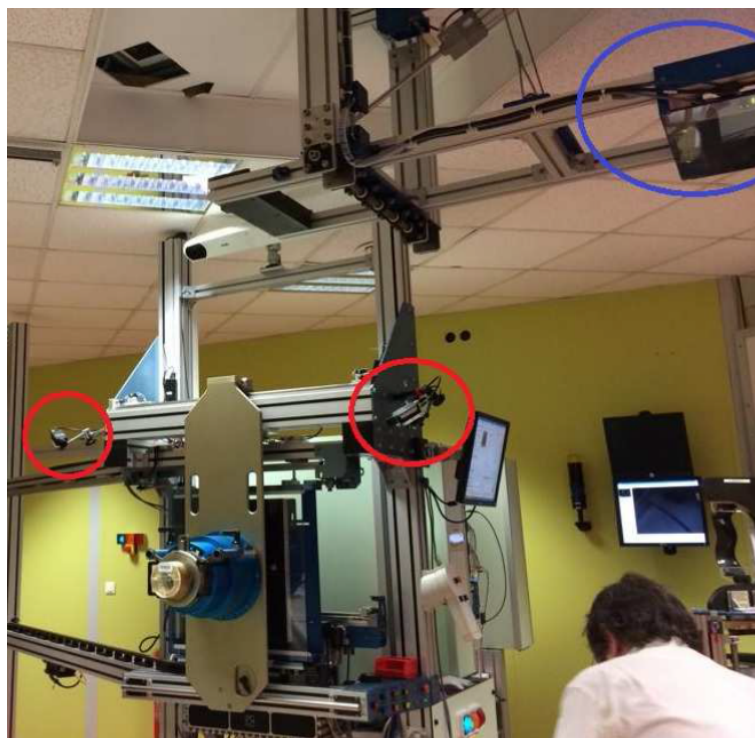


Figura 17 – Posicionamento das câmeras dentro da sala de tratamento

Na sala de controle, um profissional da saúde visualiza uma foto do paciente, tirada após o correto posicionamento do mesmo, e desenha marcações (figura 18) sobre a imagem de acordo com marcadores da máscara (furos estrategicamente posicionados). Terminadas estas marcações, é exibida na mesma tela uma imagem em tempo real do paciente. Deste modo, o profissional pode acompanhar em tempo real o posicionamento da cabeça do paciente em relação à posição inicial, tida como ideal, e interrompe e recomeça o tratamento caso esta diferença ultrapasse uma tolerância pré-definida.



Figura 18 – Profissional da saúde realizando as marcações necessárias para controle do deslocamento da cabeça do paciente

Ainda um ultimo procedimento é necessário antes de iniciar a dosagem de radiação. Um fator de árduo controle é a movimentação interna do tumor, assim como seu tamanho ao longo das diversas sessões de tratamento. Para contornar este problema, uma vez que o paciente esteja na posição pré-definida e tenha seu posicionamento monitorado, são geradas duas imagens por radiografia para que o médico responsável pelo tratamento avalie o posicionamento do tumor em relação ao ultimo exame, de acordo com a figura 19.

Um dos equipamentos de raio-x instalados na sala pode ser visualizado dentro do circulo azul na figura 17.

Por fim, uma vez feitas todas as correções necessárias na posição final do paciente, o médico responsável dá seu aval para o inicio da incidência do raio protônico sobre o tecido doente.

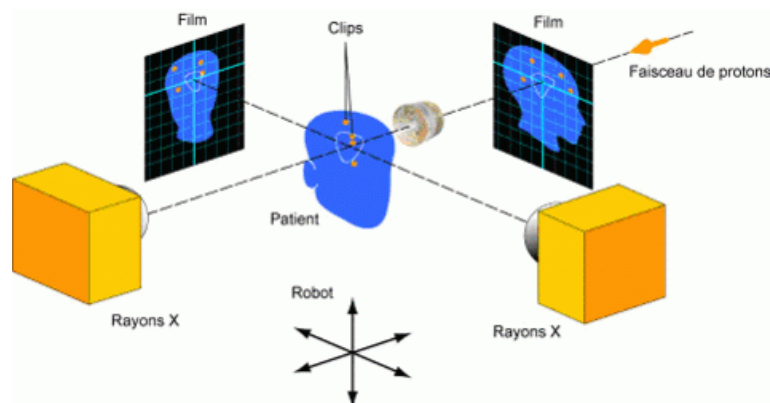


Figura 19 – Ilustração esquemática de como é feito o controle do posicionamento interno do tumor momentos antes da aplicação de radiação **Fonte:** <http://protontherapie.curie.fr/>

## 3.2 O Robô

O robô estudado neste projeto é composto por uma junta linear, que compõe a base do manipulador, e cinco juntas rotativas. A interface operador/robô é distribuída normalmente em duas telas (podendo ser uma em casos específicos), que são ligados diretamente ao armário de acionamento (destacado em laranja na figura 20). Este armário abarca o cabeamento, os equipamentos de controle da potência que será transferida aos atuadores do robô e algumas partes dos dispositivos de segurança, como as conexões dos botões 'Validação' e 'Acionamento'.

Entre o armário e o robô propriamente dito, existe uma caixa de segurança (destacada em amarelo na figura 20), que é responsável por controlar as entradas e saídas de dados no robô. Nesta caixa são ainda posicionadas chaves de liga/desliga e de parada de emergência.

Para acoplar e desacoplar as ferramentas que apoiam o paciente (cadeira e leito) e o fantasma, é utilizado um mecanismo acoplador de ar comprimido (destacado em vermelho na figura 20), que é fornecido por uma linha que tem sua pressão limitada a 6 bar por uma válvula de segurança. Este mecanismo é posicionado sobre a ultima junta do robô e é cabado passando pela caixa de segurança. Seu controle é feito por meio de duas chaves virtuais ('Acoplar' e 'Desacoplar'), que só podem ser acionadas quando o robô não se encontra em movimento.

Sendo um robô que opera no escopo medicinal, existem algumas exigências de segurança que devem ser seguidas para garantir o bem-estar e conforto do paciente, a eficácia do tratamento, e por fim mas não menos importante, a segurança de todas as pessoas envolvidas.

Visando estar em acordo com estes parâmetros, o controle do robô deve ter no mínimo duas chaves de parada de urgência - uma na sala de controle (na caixa de chaves destacada em azul na figura 20) e outra na sala de tratamento (na caixa de chaves destacada em verde na figura 20) -, bem como uma chave nomeada 'Validação', que deve ser pressionada entre todas as ordens de comando e a movimentação do robô, e continuar acionada durante a execução do comando. É necessária também uma chave 'Acionamento', que deve se manter acionada durante o envio e também durante a execução dos comandos fornecidos ao robô. Ambas as chaves 'Validação' e 'Acionamento' são instaladas na caixa de chaves destacada em azul na figura 20.



Figura 20 – Sala de testes do robô

Por fim, deve-se aplicar redundâncias na limitação de alguns parâmetros de funcionamento, ou seja, limitar os mesmos tanto pelo software quanto pela caixa de segurança, e se possível também pelo armário de acionamento. Tais parâmetros são velocidade, aceleração, tranco, os limites de cada junta, e quando possível o nível de vibração gerado pelos controladores do robô ou por sistemas eletroeletrônicos.

Como já foi destacado anteriormente neste trabalho, a precisão no posicionamento final do robô é de vital importância nesta aplicação. Portanto, a mesma tem uma tolerância de 1,5 mm ou 1,5° em relação à posição final especificada pelo médico responsável. Para respeitar todas as restrições supracitadas, o robô é equipado com um sensor de velocidade e um de aceleração em cada junta robótica, sensores de inclinação na ferramenta equipada e uma câmera que funciona como sensor de posição por infravermelho (mostrada em detalhe na figura 21), que é instalada em uma posição fixa da sala de tratamento de acordo com o que mostra a figura 22.



Figura 21 – Destaque da câmera infravermelho utilizada na verificação da acurácia do posicionamento



Figura 22 – Posicionamento da câmera infravermelho na sala de tratamento

## 4 Referencial Teórico

O projeto de um robô passa por diversas etapas, uma ou outra obtendo mais importância devido à diferentes aplicações de diferentes robôs, sejam eles manipuladores, voadores, subaquáticos, etc.

No entanto, uma das principais em praticamente qualquer tipo de robô é a cinemática de posição, tanto direta quanto inversa, pois é à partir daí que conhecemos melhor os mecanismos de movimento pertencentes ao robô, e podemos então começar a controlar o mesmo.

### 4.1 Estruturas Geométricas Básicas

O robô aqui tratado se trata de um tipo não convencional de manipulador, sendo formado por links e juntas robóticas que definem seus graus de liberdade. Além disso, os robôs deste tipo geralmente possuem atuadores finais (no nosso caso a mesa, cadeira ou fantasma), controladores, sensores para realimentação de parâmetros, processadores e uma interface (normalmente feita por software) que permita ao usuário final controlar o manipulador, ou aplicar modificações no mesmo.

Para melhor entendimento da cinemática apresentada neste estudo, adotaremos como conceitos:

**Link:** Corpo rígido individual que pode ter movimento relativo a outros links, um par de links é ligado com uma junta.

**Junta:** Conexão entre dois links, fornece o grau de liberdade. Juntas podem ser do tipo revolutas ou prismáticas. A variável que representa a junta é chamada de *coordenada de junta*.

Um robô normalmente é composto de 6 juntas, sendo que 3 fazem parte do manipulador e 3 do pulso esférico. Um robô com mais de 6 juntas é normalmente chamado de robô redundante, pois possui mais graus de liberdade do que os seis necessários ao movimento geral (3 de rotação e 3 de translação).

A redundância não é necessariamente uma desvantagem, existem robôs estrategicamente redundantes, de modo a poderem alcançar objetos atrás de anteparos ou utilizando o grau de liberdade extra para evitar que o sistema se torne singular em alguma posição.

#### 4.1.1 Manipulador Robótico

O corpo principal do robô, que consiste de links, juntas e outros elementos estruturais, é chamado de manipulador. Um manipulador se torna um robô quando um pulso e um efetuator final são acoplados, e o sistema de controle é implementado. Entretanto há literaturas que utilizam robô e manipulador como equivalentes.

Na figura 23 é exibida a representação de um manipulador com 3 juntas revolutas. Este modelo também é conhecido por *Elbow Manipulator*, dada sua semelhança com o braço humano.

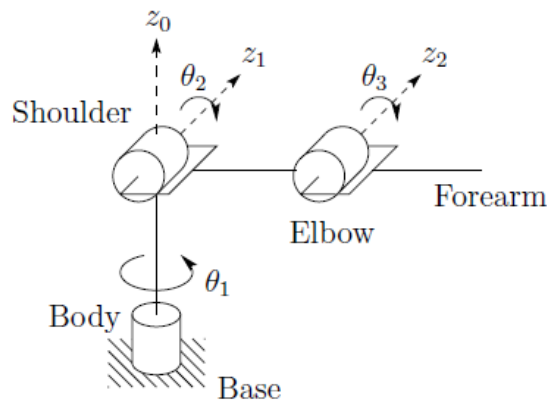


Figura 23 – Manipulador do tipo 3R  
Fonte: Spong

#### 4.1.2 Pulso Robótico

Pulso é o nome dado ao equipamento que garante o controle de orientação da ferramenta do robô, além dos 3 graus de liberdade garantidos já pelo manipulador.

Um pulso esférico simplifica muito a análise cinemática de um robô, permitindo ao projetista desacoplar completamente o controle de posição e orientação, podendo resolver cada um separadamente. Apesar de normalmente um manipulador ter 3 graus de liberdade de posição, o número de graus de liberdade de orientação depende efetivamente do tipo de pulso, sendo o mais comum o pulso esférico, que garante 3 graus de orientação sendo dois de rolagem intercalados com um de mergulho na maioria dos casos.

## 4.2 Modelamento Matemático

Já tendo sido definido como um conjunto de links e juntas, um robô pode ser então modelado matematicamente em função destes links e das variáveis de junta. O modelamento do robô pode ser dividido em modelamento cinemático, que consiste em Cinemática Direta, Inversa e de Velocidade e em modelamento dinâmico, que envolve a Cinemática de Aceleração e a Dinâmica de Movimento. Neste trabalho serão abordadas apenas os aspectos cinemáticos.

**Cinemática:** é a ciência da geometria em movimento, restrita à pura descrição geométrica do movimento por meio de posição, orientação e suas derivadas temporais. Em robótica, a descrição cinemática dos manipuladores e suas tarefas é utilizada para preparar as equações fundamentais que embasarão a dinâmica e o controle final.

### 4.2.1 Cinemática Direta

A partir das variáveis de junta de um robô e de um dado conjunto de características geométricas do mesmo, pode-se determinar a posição e a orientação de cada link deste. Este tipo de análise é chamado *cinemática direta*. O principal objetivo da cinemática direta é encontrar a posição do efetuador final em função das variáveis de junta.

A informação cinemática inclui posição, velocidade, aceleração e tranco. Entretanto a cinemática direta geralmente refere-se apenas à análise da posição, como é o caso aqui analisado.

A cinemática direta é geralmente apresentada em forma de matrizes de transformação. É comum utilizar a matriz que referencia as coordenadas cartesianas e orientação do efetuador final em relação aos ângulos de junta, mas o encontro das matrizes de transformação entre cada junta não é raro. A transformação segue a receita de uma transformação linear comum.

O método mais prático de encontrar a cinemática direta é a Convenção de Denavit-Hartenberg, que é dividido normalmente em 9 passos que serão descritos a seguir. Outro método é o cálculo direto, onde o projetista encontra a matriz de transformação homogênea de cada junta e opera com estas para achar a transformação final.

#### 4.2.1.1 A Convenção de Denavit-Hartenberg

Um robô com  $n$  juntas possui  $n+1$  links. Enumerando os links, começando de (0) para o link base (imóvel) e acrescentando sequencialmente até ( $n$ ) para o efetuador final. Enumerando as juntas, começando de 1 para a junta que conecta o primeiro link móvel para o link base e acrescentando sequencialmente até  $n$ . Então o link ( $i$ ) é conectado ao link inferior ( $i-1$ ) em sua *extremidade proximal* pela junta  $i$  e é conectado ao link superior  $i+1$  em sua *extremidade distal* pela junta  $i+1$ , como exibido na figura 24

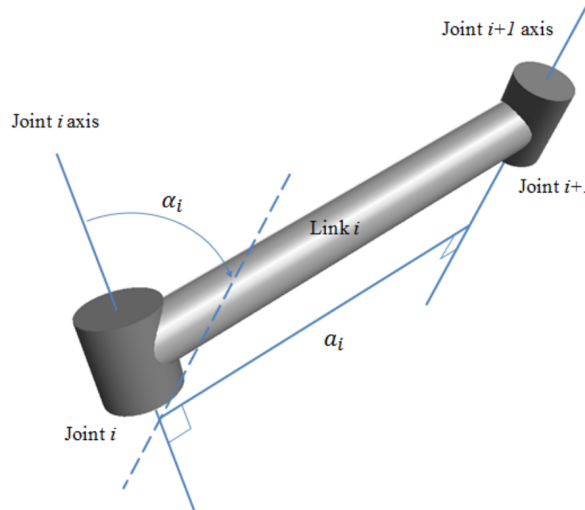


Figura 24 – Link ( $i$ ) e sua junta inicial ( $i$ ) e junta final ( $i+1$ )

**Fonte:** <http://www.maplesoft.com/>

A aplicação da convenção de Denavit-Hartenberg é padronizada e segue uma receita em 7 passos.

1. Localizar e marcar os eixos  $z_0 \dots z_{n-1}$  na direção dos eixos das juntas  $1 \dots n$
2. Estabelecer o sistema de referência da base 0. Colocar a origem  $o_0$  em qualquer ponto do eixo  $z_0$ . Estabelecer os eixos  $x_0$  e  $y_0$  tais que o sistema seja dextrógiro. Para  $i = 1 \dots n - 1$ , repetir os passos 3 a 5 a seguir:
3. Localizar a origem  $o_i$  onde a normal comum a  $z_i$  e  $z_{i-1}$  intercepta  $z_i$ . Se  $z_i$  intercepta  $z_{i-1}$ , localizar  $o_i$  na interseção. Se  $z_i$  e  $z_{i-1}$  são paralelos, localizar  $o_i$  na junta  $i$

4. Localizar  $x_i$  ao longo da normal comum entre  $z_i$  e  $z_{i-1}$  através de  $o_i$ , ou na direção normal ao plano  $z_{n-1}$  ou se  $z_i$  se estes se interceptam
5. Localizar  $y_i$  para que o sistema seja dextrógiro
6. Localizar o sistema do elemento final  $o_n x_n y_n z_n$ :  $z_n$  se localiza na direção de  $z_{n-1}$ ;  $x_n$  deve ser normal a  $z_{n-1}$  e  $z_n$ ;  $y_n$  deve ser tal que o sistema seja dextrógiro
7. Criar uma tabela com os parâmetros de Denavit-Hartenberg
  - $a_i$  = distância desde a interseção de  $x_i$  e  $z_{i-1}$  até  $o_i$ , ao longo de  $x_i$
  - $d_i$  = distância desde  $o_{i-1}$  até a interseção de  $x_i$  e  $z_{i-1}$ , ao longo de  $z_{i-1}$
  - $\alpha_i$  = ângulo entre  $z_{i-1}$  e  $z_i$ , medido em torno de  $x_i$
  - $q_i$  = ângulo entre  $x_{i-1}$  e  $x_i$ , medido em torno de  $z_{i-1}$

(BENTO FILHO, 2012)

Apesar do método apresentado acima ser comumente adotado por ser uma certa forma de padronização, a cinemática direta posteriormente apresentada foi feita baseando-se em matrizes homogêneas estrategicamente posicionadas, de forma a simplificar futuros cálculos e futuras configurações de matrizes de transformações.

Isso se deveu à particularidade do robô aqui tratado, pois devido à peculiaridades de sua configuração geométrica, o mesmo se provou mais adequado à utilização direta das matrizes de transformação homogênea em cada grau de liberdade e também em cada descontinuidade geométrica fixa do robô em favor da padronização de Denavit-Hartenberg.

#### 4.2.2 Cinemática Inversa

A seção anterior abordava a cinemática direta, para qual, dadas as variáveis de junta encontra-se a configuração do robô. A cinemática inversa por sua vez, dada a configuração do robô pede as variáveis de junta. O problema se torna mais complexo, pois normalmente para dada configuração existe mais de um conjunto de variáveis de junta que possa atendê-la, como demonstrado na figura 25.

A determinação das variáveis de junta se reduz à solução de de um conjunto de equações algébricas não-lineares. Apesar de não existir um método padronizado e geral para o cálculo da cinemática inversa, existem alguns métodos numéricos e analíticos para resolver o problema.

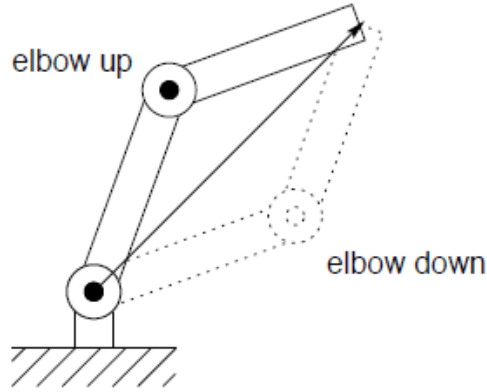


Figura 25 – Soluções múltiplas da cinemática inversa para um manipulador plano 2R

O primeiro método escolhido para a execução de trabalhos futuros seria a transformada inversa (JAZAR, 2010). Neste método o autor sugere que é possível desacoplar o problema da cinemática inversa em dois sub-problemas, conhecidos como *posição inversa* e *orientação inversa*. A consequência prática disso é que desacoplar permite separar o problema em dois independentes, cada um com apenas três parâmetros desconhecidos. Partindo deste princípio, a matriz de transformação geral de um robô pode ser decomposta em translação e rotação, conforme exibido nas equações 4.1 e 4.2.

Num robô com 6 graus de liberdade a matriz de translação  ${}^0D_6$  indica a posição do efetuador final em relação ao sistema de referência com base em  $B_0$  e envolve apenas três variáveis de junta do manipulador. O sistema  ${}^0d_6$  pode ser resolvido para variáveis que controlam a posição do pulso. A matriz de rotação  ${}^0R_6$  indica a orientação do efetuador final em  $B_0$  e envolve apenas três variáveis de junta do pulso. O sistema  ${}^0R_6$  pode ser resolvido para variáveis que controlam a orientação do pulso.

$${}^0T_6 = {}^0T_1 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} {}^0R_6 & {}^0d_6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0D_6 {}^0R_6 = \begin{bmatrix} I & {}^0d_6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} {}^0R_6 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Outros métodos de como abordar o problema da cinemática inversa foram descritos por Jazar (2010), mas não serão abordados neste trabalho.

## 5 Modelagem do Protótipo

### 5.1 Parâmetros Geométricos do Robô

Diversas características foram levadas em consideração para a escolha da geometria do manipulador. No entanto, os fatores que potencialmente mais influenciaram na determinação da configuração escolhida foram as limitações geométricas da sala de tratamento e as condições de operação que serão citadas posteriormente.

Analizadas estas características, foi definido como mais apropriado para esta aplicação um manipulador de seis juntas, sendo apenas a primeira linear (junta branca da figura 26), e cujo a terceira junta possui inclinação menor de 90 graus (junta vermelha), tornando mais acessível e viável o posicionamento do quinto link (ilustrado em verde) mais próximo ao solo e ao mesmo tempo perpendicular ao mesmo.

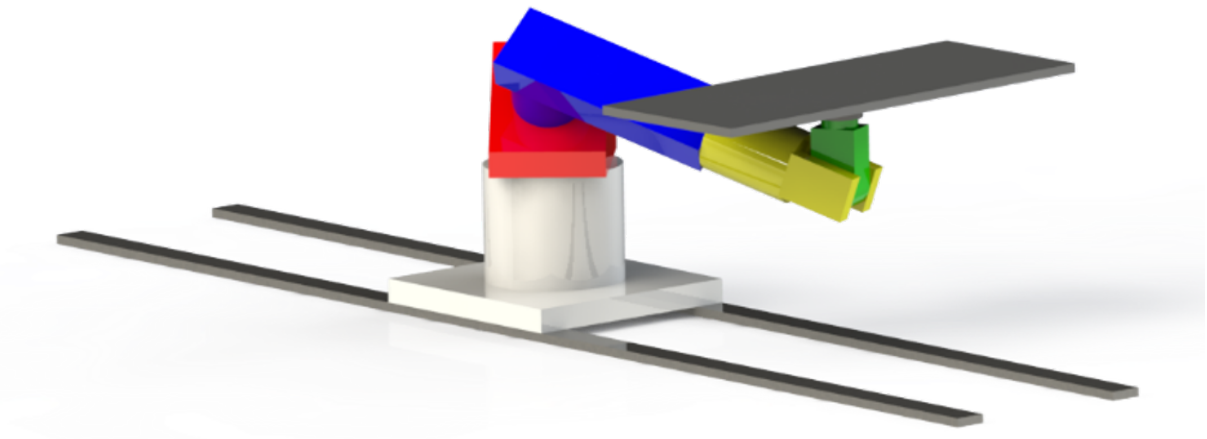


Figura 26 – Representação em 3D do manipulador - diferentes links/juntas com diferentes cores. Na ordem crescente: branco, vermelho, azul, amarelo, verde e preto.

Esta restrição é devida às características operacionais do robô. Relembramos que a função deste manipulador é posicionar pacientes para tratamento, portanto, o mesmo transporta enfermos de uma posição a outra em um espaço cartesiano. Com isso em mente, podemos facilmente perceber a necessidade do mesmo manter a ferramenta acoplada, seja ela cadeira, leito ou fantasma, sempre paralela ao solo.

Além disso, é necessário que não se apresentem empecilhos ao posicionar o ultimo link próximo ao chão, pois frequentemente o robô realizará movimentos de pegar e/ou deixar o paciente próximo ao solo, vezes para liberar o leito na maca, vezes para que o mesmo possa se levantar sozinho, e finalmente, para que os operadores do manipulador não encontrem grandes dificuldades ao acoplar o fantasma para calibração.

Analizadas as características operacionais e geométricas do autômato, percebemos a necessidade de definir algumas restrições atuantes durante o funcionamento e movimentação do mesmo. Por exemplo, devemos traçar estratégias que garantam, quando necessário, o paralelismo entre a ferramenta acoplada e o solo.

Para atender tais condições no momento em que elas se tornam necessárias, a estratégia utilizada neste caso foi segmentar a trajetória do robô, de modo que o modelamento matemático destas condições é aplicado em partes da trajetória. Para clarificar tudo o que foi discutido nesta seção, imaginemos a seguinte trajetória:

- (a) O robô com o leito se move de forma a posicionar o ultimo link (link verde da figura 26) próximo ao solo para receber o paciente.
- (b) Com o paciente posicionado sobre o leito, o manipulador transporta o paciente até o ponto definido pelos operadores para incisão do feixe protônico.
- (c) Finalmente, o robô inclina o paciente, de modo a definir a direção de incisão do feixe protônico.

Em cada ponto da trajetória, temos condições bem específicas que devem ser obedecidas durante a operação do manipulador, sendo elas:

- (a) No fim deste movimento a ferramenta acoplada ao robô deve estar paralela ao solo
- (b) Este movimento inteiro deve ser realizado com a ferramenta paralela ao solo, para garantir um maior conforto, e por consequência um menor nível de estresse ao paciente, o que é um fator importante para que o mesmo se mantenha imóvel durante a aplicação da dose de radiação.
- (c) Neste movimento, o ponto final da trajetória já foi atingido, portanto, a movimentação do robô deve se dar de tal forma que o mesmo forneça à ferramenta a inclinação necessária enquanto mantém um ponto de referência constante.

## 5.2 Cinemática Direta

O estudo e levantamento da cinemática direta do robô aqui tratado começou à partir de pontos de movimento fornecidos pelos profissionais responsáveis pelo projeto mecânico do manipulador, tal como mostrado na figura 27.

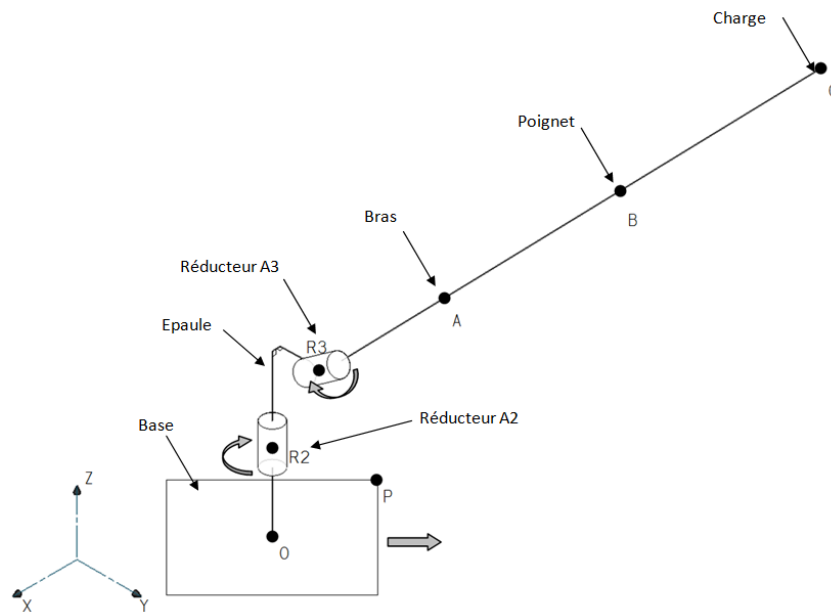


Figura 27 – Pontos de movimentos do robô

Onde

$$O = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} -0.509 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.25 \end{bmatrix}, R_3 = \begin{bmatrix} -0.04 \\ 0.2 \\ 0.8 \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.64 \\ 0.2 \\ 0.8 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -1.54 \\ 0.25 \\ 0.835 \end{bmatrix} \text{ e } C = \begin{bmatrix} -2.54 \\ 0.25 \\ 0.835 \end{bmatrix}$$

Sendo os pontos A, B e C a posição espacial das juntas do pulso esférico em relação à origem, e O, R2 e R3 o posicionamento das três juntas de base e P é o ponto extremo da guia linear, e se encontra num mesmo plano horizontal que O.

A partir destes pontos, foi traçado, com a ajuda de um software integrado de CAD, um perfil de pontos e retas (figura 28), onde cada ponto representa uma junta, que por sua vez insere um grau de liberdade adicional no sistema. As linhas que ligam uma junta à outra representam os links do manipulador, e são igualmente importantes na definição da cinemática do robô.

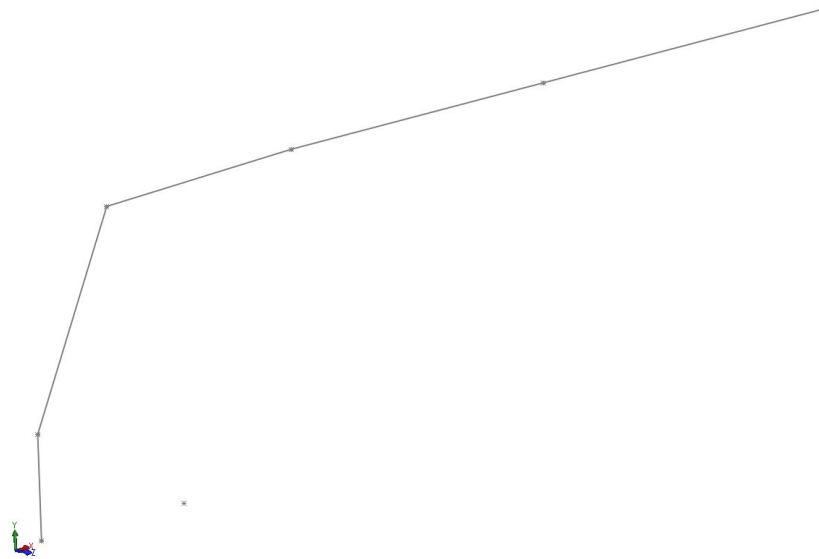


Figura 28 – Esqueleto de juntas e links na posição inicial do manipulador

Para melhor adaptar o posicionamento dos pontos de junta aos referenciais utilizados pelo software, foi aplicada uma mesma matriz de rotação  $T_p$  em todos os pontos fornecidos, onde

$$T_p = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Uma vez obtidos a posição das juntas no espaço e os links que ligam uma junta à outra, a partir da estrutura do manipulador foi possível determinar o eixo de atuação de cada junta. Portanto, o ultimo passo dado entre a obtenção da disposição das juntas no espaço e a construção dos sistemas de referencia necessários ao estudo da cinemática foi o traçado dos eixos de atuação das juntas e a verificação de suas interseções e projeções para determinar a configuração dos graus de liberdade (figura 29).

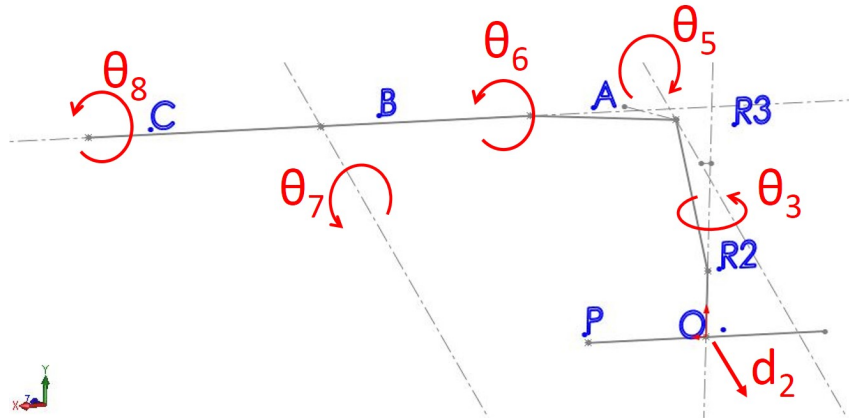


Figura 29 – Esqueleto de juntas e links na posição inicial do manipulador com destaque na direção de atuação das juntas e sua relação com os pontos iniciais

Deu-se início então a um processo de engenharia reversa, onde os links foram reconstruídos no mesmo software CAD anteriormente mencionado. Os links foram desenhados como sólidos, respeitando as dimensões e condições de operação impostas pelas juntas. Tomou-se por base as guias, que foram fixadas em sua posição, e todos os links foram refeitos à partir delas, seguindo uma ordem onde o próximo link era desenhado e posicionado no espaço à partir do link anterior, formando por fim a montagem completa, mostrada na figura 30.

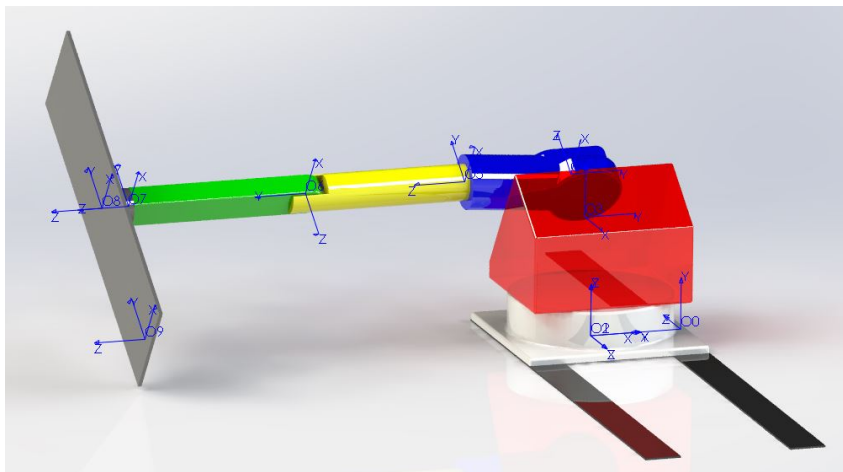


Figura 30 – Montagem final do manipulador

Estabelecidos os links e os graus de liberdade inseridos pelas juntas, o próximo passo para a determinação da cinemática direta foi dado definindo sistemas dextrogeños de coordenada estrategicamente posicionados, geralmente sobre as juntas, de forma que o eixo  $z$  coincida com o eixo de atuação da junta seguinte. As figuras 31 e 32 ilustram duas possíveis configurações das juntas, e como ficam os sistemas de coordenadas adotados.

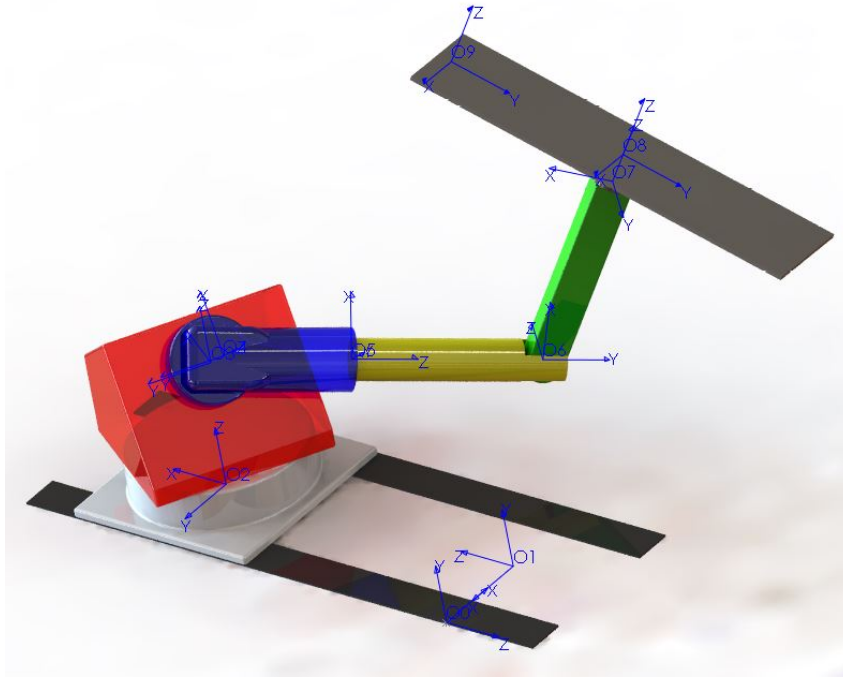


Figura 31 – Possível configuração das juntas (a)

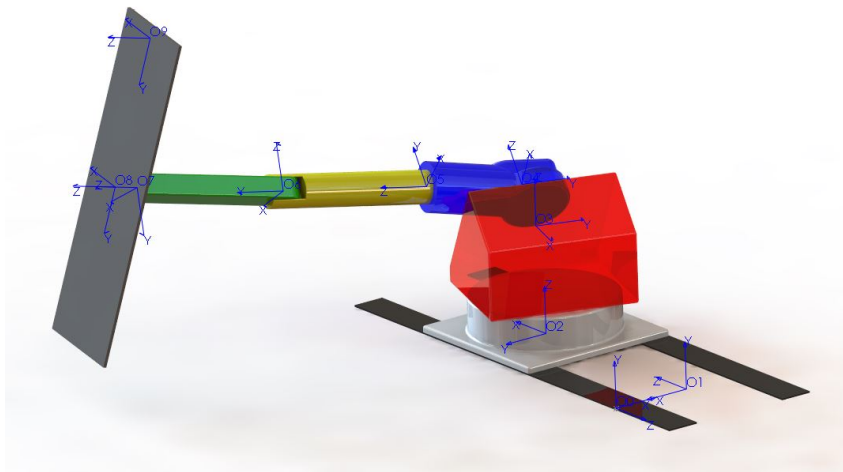


Figura 32 – Possível configuração das juntas (b)

Por fim, utilizando os sistemas adotados, foram calculadas as matrizes homogêneas de transformação de um eixo de coordenadas para o próximo.

$$\begin{aligned}
A_{10} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_{32} = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_y 2\beta s_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & -l_y 2\beta c_2 \\ 0 & 0 & 1 & l_z 2\beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
A_{43} &= \begin{bmatrix} c_\alpha & 0 & -s_\alpha & l_{34} s_\alpha \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s_\alpha & 0 & c_\alpha & l_{34} c_\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_{54} = \begin{bmatrix} c_5 & 0 & s_5 & l_{45} s_5 \\ s_5 & 0 & -c_5 & -l_{45} c_5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_{65} = \begin{bmatrix} c_6 & 0 & s_6 & 0 \\ s_6 & 0 & -c_6 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
A_{76} &= \begin{bmatrix} c_7 & 0 & -s_7 & -l_{67} s_7 \\ s_7 & 0 & c_7 & l_{67} c_7 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_{87} = \begin{bmatrix} c_8 & -s_8 & 0 & 0 \\ s_8 & c_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_{78} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

e por fim

$$A_{98} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -l_{89} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A matriz de transformação da cabeça do paciente para a origem global ficou então sendo

$$A_{90} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

onde

$$\begin{aligned}
n_x &= (((-s_3 c_\alpha c_5 - c_3 s_5) c_6 + s_3 s_\alpha s_6) c_7 + (-s_3 c_\alpha s_5 + c_3 c_5) s_7) c_8 + \\
&((-s_3 c_\alpha c_5 - c_3 s_5) s_6 - s_3 s_\alpha c_6) s_8 \\
s_x &= -((( -s_3 c_\alpha c_5 - c_3 s_5) c_6 + s_3 s_\alpha s_6) c_7 + (-s_3 c_\alpha s_5 + c_3 c_5) s_7) s_8 + \\
&((-s_3 c_\alpha c_5 - c_3 s_5) s_6 - s_3 s_\alpha c_6) c_8 \\
a_x &= -((-s_3 c_\alpha c_5 - c_3 s_5) c_6 + s_3 s_\alpha s_6) s_7 + (-s_3 c_\alpha s_5 + c_3 c_5) c_7
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_x &= - \left( - \left( (-s_3 c_\alpha c_5 - c_3 s_5) c_6 + s_3 s_\alpha s_6 \right) c_7 + (-s_3 c_\alpha s_5 + c_3 c_5) s_7 \right) s_8 + \\
& \left( (-s_3 c_\alpha c_5 - c_3 s_5) s_6 - s_3 s_\alpha c_6 \right) c_8 l_{89} + \left( - \left( (-s_3 c_\alpha c_5) \right) - c_3 s_5 c_6 + s_3 s_\alpha s_6 s_7 + (-s_3 c_\alpha s_5 + c_3 c_5) c_7 l_{78} - \right. \\
& \left. \left( (-s_3 c_\alpha c_5 - c_3 s_5) c_6 + s_3 s_\alpha s_6 \right) l_{67} s_7 + (-s_3 c_\alpha s_5 + c_3 c_5 l_{67} c_7 + (-s_3 c_\alpha s_5 + c_3 c_5) l_{56} - s_3 c_\alpha l_{45} s_5 + \right. \\
& \left. c_3 l_{45} c_5 - s_3 l_{34} s_\alpha + l_{y23} c_2 + l_1 \right. \\
n_y &= \left( (s_\alpha c_5 c_6 + c_\alpha s_6) c_7 + s_\alpha s_5 s_7 \right) c_8 + (s_\alpha c_5 s_6 - c_\alpha c_6) s_8 \\
s_y &= - \left( (s_\alpha c_5 c_6 + c_\alpha s_6) c_7 + s_\alpha s_5 s_7 \right) s_8 + (s_\alpha c_5 s_6 - c_\alpha c_6) c_8 \\
a_y &= - (s_\alpha c_5 c_6 + c_\alpha s_6) s_7 + s_\alpha s_5 c_7 \\
p_y &= - \left( - \left( (s_\alpha c_5 c_6 + c_\alpha s_6) c_7 + s_\alpha s_5 s_7 \right) s_8 + (s_\alpha c_5 s_6 - c_\alpha c_6) c_8 \right) l_{89} \\
& + \left( - (s_\alpha c_5 c_6 + c_\alpha s_6) s_7 + s_\alpha s_5 c_7 \right) l_{78} - (s_\alpha c_5 c_6 + c_\alpha s_6) l_{67} s_7 + s_\alpha s_5 l_{67} c_7 + s_\alpha s_5 l_{56} + s_\alpha l_{45} s_5 + \\
& l_{34} c_\alpha + l_{z23} \\
n_z &= \left( (-c_3 c_\alpha c_5 + s_3 s_5) c_6 + c_3 s_\alpha s_6 \right) c_7 + (-c_3 c_\alpha s_5 - s_3 c_5) s_7 \\
c_8 & + \left( (-c_3 c_\alpha c_5 + s_3 s_5) s_6 - c_3 s_\alpha c_6 \right) s_8 \\
s_z &= - \left( (-c_3 c_\alpha c_5 + s_3 s_5) c_6 + c_3 s_\alpha s_6 \right) c_7 + (-c_3 c_\alpha s_5 - s_3 c_5) s_7 \\
& + \left( (-c_3 c_\alpha c_5 + s_3 s_5) s_6 - c_3 s_\alpha c_6 \right) c_8 \\
a_z &= - \left( (-c_3 c_\alpha c_5 + s_3 s_5) c_6 + c_3 s_\alpha s_6 \right) s_7 + (-c_3 c_\alpha s_5 - s_3 c_5) c_7 \\
p_z &= - \left( - \left( (-c_3 c_\alpha c_5 + s_3 s_5) c_6 + c_3 s_\alpha s_6 \right) c_7 + (-c_3 c_\alpha s_5 - s_3 c_5) s_7 \right) s_8 + \left( (-c_3 c_\alpha c_5 \right. \\
& + s_3 s_5 s_6 - c_3 s_\alpha c_6 l_{89} + \left( - \left( (-c_3 c_\alpha c_5 + s_3 s_5) c_6 + c_3 s_\alpha s_6 \right) s_7 + (-c_3 c_\alpha s_5 - s_3 c_5) c_7 \right) l_{78} - \left( (-c_3 c_\alpha c_5 \right. \\
& + s_3 s_5 c_6 + c_3 s_\alpha s_6 l_{67} s_7 + (-c_3 c_\alpha s_5 - s_3 c_5) l_{67} c_7 + (-c_3 c_\alpha s_5 - s_3 c_5) l_{56} - c_3 c_\alpha l_{45} s_5 - s_3 l_{45} c_5 - \\
& \left. c_3 l_{34} s_\alpha - l_{y23} s_2 - d_2 \right.
\end{aligned}$$

Repare que, para simplificarmos as expressões, adotamos  $\cos(\theta_a) = c_a$  e  $\sin(\theta_a) = s_a$ .

### 5.3 Validação da Cinemática Direta

Para validar as equações encontradas, utilizamos um software matemático e um software de estudo de movimento com os desenhos tridimensionais dos links previamente mostrados. Comparamos então as coordenadas finais do ponto da cabeça do paciente com o resultado numérico das multiplicações matriciais fornecido pelo software matemático.

As constantes dimensionais do manipulador em questão são:

$$l_{01} = 254.5$$

$$l_{y23} = 40$$

$$l_{z23} = 659.958492$$

$$l_{34} = 305.187567$$

$$l_{45} = 640$$

$$l_{56} = 900$$

$$l_{67} = 1000$$

$$l_{78} = 150$$

$$l_{89} = 925$$

$$\alpha = -55^\circ$$

Foram feitas três validações (figuras 33, 34 e 35) para parâmetros de junta aleatórios. A seguir são apresentados os parâmetros de junta de cada validação (destacados em verde), a matriz de transformação  $A_{90}$  multiplicada por uma matriz de transformação da origem de  $O_0$  para a origem do software de estudo de movimento resultada do software de matemática simbólica utilizado (destacado em vermelho), e o ponto tridimensional obtido no software de estudo de movimento quando aplicados os mesmos parâmetros de junta.

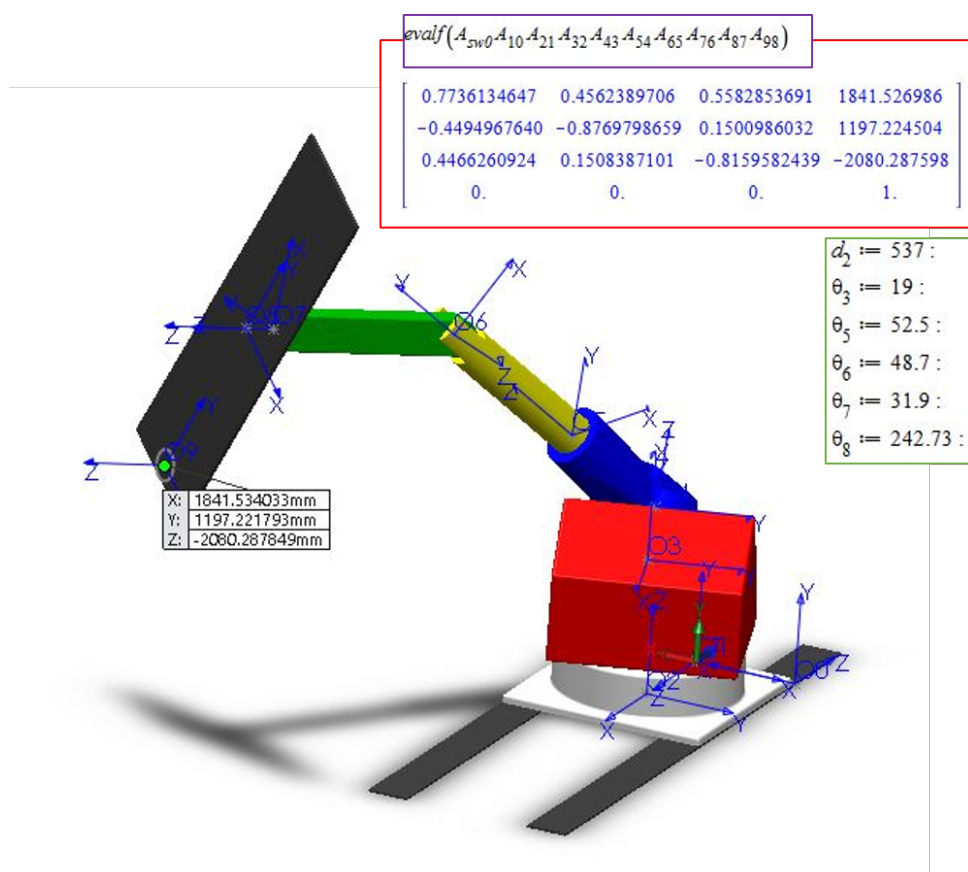


Figura 33 – Primeira validação

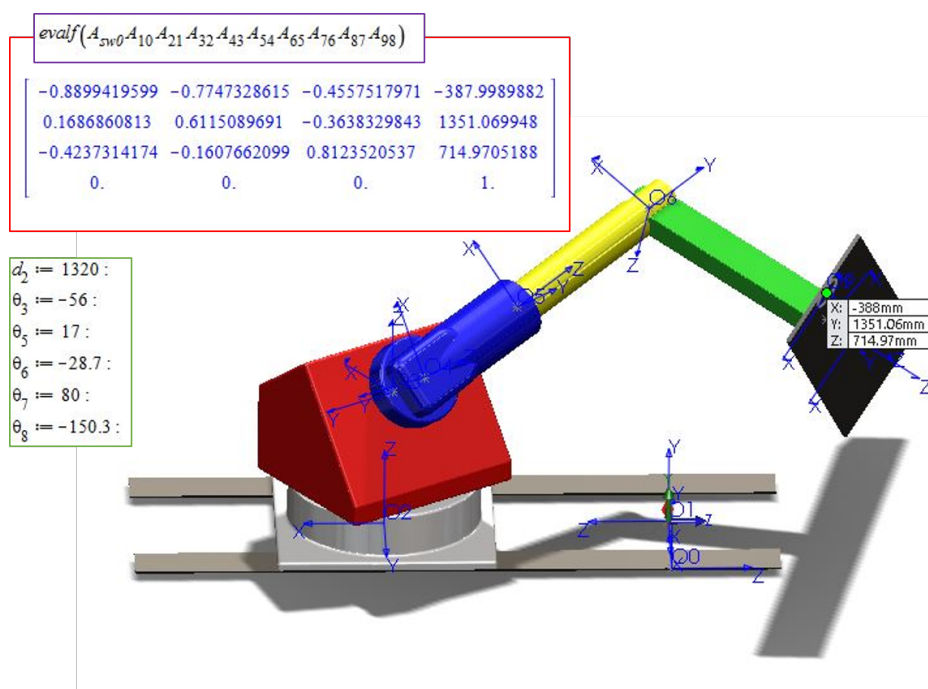


Figura 34 – Segunda validação

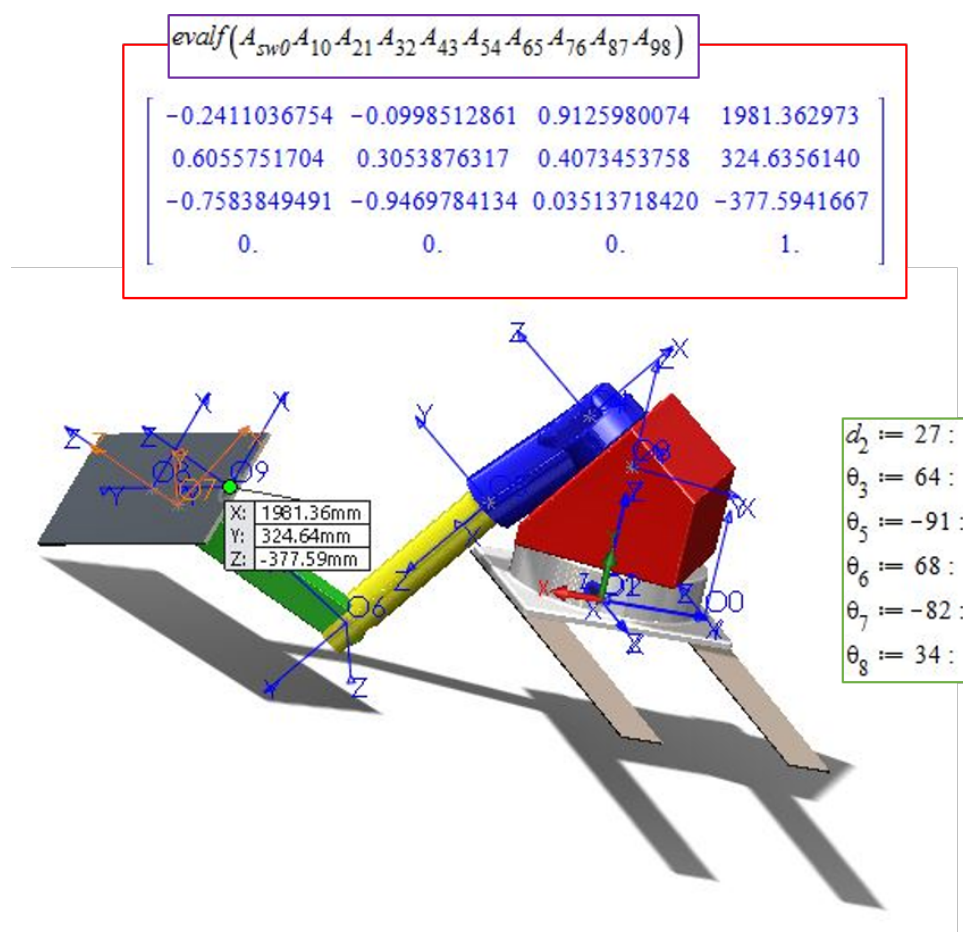


Figura 35 – Terceira validação

## 6 Conclusão

Apesar de serem utilizados já há algum tempo nos mais diversos setores industriais, robôs manipuladores ainda não podem ser considerados uma tecnologia completamente dominada. Isso se deve à infinidade de possibilidades de otimizações ainda correntes atualmente, sejam elas de caráter geométrico (como a ocupação de um espaço menor sem perda de operabilidade, tomando como exemplo o caso estudado neste trabalho) sejam na interface final entre usuário e máquina, ou qualquer outro aspecto presente no projeto de um robô deste tipo.

O estudo da cinemática de um robô não convencional, e por consequente não comumente tratado na literatura, se provou interessantíssimo, porém vai de oposto ao trivial. No entanto, com a ajuda dos mais diversos softwares hoje disponíveis no mercado e certo esforço computacional, é possível contornar problemas como a sobre-definição de um sistema de equações ou a - de certa forma - limitada visão espacial característica dos seres humanos.

Quanto à aplicação de um robô manipulador para o posicionamento de pacientes, apesar de matematicamente se alcançar a precisão necessária, para alcançar esta mesma precisão durante operação é imprescindível uma realimentação externa, neste caso a câmera infravermelha. Além disso, deve-se ter em mente que a precisão do posicionamento do robô apenas não é suficiente para este tipo de aplicação, e apesar de hoje não haver tecnologia que garanta este posicionamento (no caso estudado o controle da posição final é feito manualmente por profissionais da saúde), a tecnologia hoje disponível já é suficiente para viabilizar este tipo de aplicação.

A cinemática direta do robô foi obtida com sucesso e validade, e além disso foram gerados arquivos CAD e scripts de matemática simbólica que facilitarão imensamente trabalhos futuros, como a obtenção da cinemática de velocidade e da cinemática inversa.

# Referências

- ASIMOV, I. I. *Robot (Coleção de contos publicados entre 1940 e 1950)*. Londres: Grafton Books, 1968. ISBN 9780246121004. Citado na página 14.
- BENTO FILHO, A. *Robótica Industrial - Algoritmo Denavit-Hartenberg, Notas de Aula*. 2012. Citado na página 42.
- CAMPHAUSEN, K.; LAWRENCE, R. *Principles of Radiation Therapy*. 2008. Citado na página 25.
- CARRARA, V. *Robótica, Notas de Aula*. 2011. Citado na página 14.
- FERNANDES, V. H. B. Pulso Esférico Robótico para Aplicação em Máquinas CNC de Corte de Chapas. 2014. Citado na página 14.
- J., V. *TARGIT (TARGeted Intraoperative radiation Therapy)*. 2013. Disponível em: <<http://www.targit.org.uk/>>. Citado na página 22.
- JAKEL, O. State of art in hadron therapy. In: PROCEEDINGS, A. C. (Ed.). *State of Art in Hadron Therapy*. [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 22.
- JAZAR, R. N. *Theory of Applied Robotics (2nd Edition)*. RMIT University - Melbourne, Australia: Springer, 2010. ISBN 9781441917492. Citado na página 43.
- Lenicare - Unidade de Radioterapia de Alentejo. *Lenicare*. 2013. Disponível em: <<http://www.oncologiaalentejo.com/>>. Citado na página 13.
- Particle Therapy Co-Operative Group. *Statistics of patients treated in particle therapy facilities worldwide*. 2014. Disponível em: <<http://www.ptcog.ch/>>. Citado na página 24.
- SUIT, H. *Physical and Biological Basis of Proton and of Carbon Ion Radiation Therapy and Clinical Outcome Data*. 2009. Citado na página 23.
- TEPPER, M. J. E.; BLACKSTOCK, M. A. W. *EDITORIAL: Randomized Trials and Technology Assessment*. 2009. Citado na página 25.
- TRIUMF. *Cancer Therapy with Pions*. 2014. Disponível em: <<http://www.triumf.ca/>>. Citado na página 24.